

Universidad Pública de Navarra Nafarroako Unibertsitate Publikoa

Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación
Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica



PROYECTO FIN DE CARRERA

Ingeniería Técnica Industrial, especialidad Electricidad

Diseño y optimización de un sistema de generación aislada de energía eólica orientado a las necesidades de poblaciones sin acceso a la red eléctrica

Autor: Unai Esparza Baquer

Tutor: Vicente Senosiáin Miquélez

Pamplona-Iruñea, 2 de diciembre de 2011

INDICE

1- OBJETIVO

2- INTRODUCCIÓN

3- COMPONENTES DEL SISTEMA: TURBINA

3.1- DESCRIPCIÓN DE LA TURBINA

3.2- FUNCIONAMIENTO Y ECUACIONES DE LA TURBINA

3.2.1- Límite de Betz

3.2.2- Otros modelos para hallar C_{Pmax}

3.2.3- Ratio de velocidades λ y coeficiente de potencia C_P

3.2.4- Sección de pala: tipos de perfiles

3.2.5- Sección de pala: perfiles NACA de 4 dígitos

3.2.6- Sección de pala: ecuaciones para el cálculo del perfil

3.2.7- Cuerda c_n

3.2.8- Momento de inercia de las palas de la turbina J_P

3.3- MODELO DE LA TURBINA

3.4- CARACTERIZACIÓN DE LA TURBINA

3.4.1- Velocidad del viento v

3.4.2- Densidad del aire ρ

3.4.3- Coeficiente de potencia máximo C_{Pmax}

3.4.4- Lambda óptima λ^*

3.4.5- Curva $C_P-\lambda$

3.4.6- Longitud de pala L

3.4.7- Sección de pala

3.4.8- Cuerda c_n , longitud de sección l_n y número de secciones N

3.4.9- Densidad del material de pala ρ_P

3.4.10- Momento de inercia de las palas J_P

4- COMPONENTES DEL SISTEMA: MULTIPLICADORA

4.1- DESCRIPCIÓN DE LA MULTIPLICADORA

4.1.1- Cálculo de la multiplicadora deseada

4.1.2- Polea

4.1.3- Correa

4.1.4- Bancada

4.2- FUNCIONAMIENTO Y ECUACIONES DE LA MULTIPLICADORA

4.2.1- Tipos de sistemas de transmisión

4.2.2- Principio de funcionamiento de la multiplicadora

4.2.3- Relación de transmisión RT

- 4.2.4- Relaciones cinemáticas
- 4.2.5- Transmisión de potencia
- 4.2.6- Rendimiento
- 4.2.7- Relaciones de par
- 4.2.8- Relaciones del momento de inercia
- 4.2.9- Momento total de inercia
- 4.2.11- Momento de inercia de la multiplicadora J_M
- 4.2.12- Momento de inercia del generador J_G
- 4.2.13- Relación entre el par del viento y par electromagnético

4.3- MODELO DE LA MULTIPLICADORA

- 4.4.1- Relación de transmisión de la multiplicadora (RT y RT')
- 4.4.2- Momento de inercia de la multiplicadora J_M
- 4.4.3- Momento de inercia del generador J_G
- 4.4.4- Momento total de inercia visto desde el secundario J_{T2}

4.4- CARACTERIZACIÓN DE LA MULTIPLICADORA

5- COMPONENTES DEL SISTEMA: GENERADOR

5.1- DESCRIPCIÓN DEL GENERADOR

5.2- FUNCIONAMIENTO Y ECUACIONES DEL GENERADOR

- 5.2.1- Características generales de la máquina síncrona
- 5.2.2- Uso como generador
- 5.2.3- Tipos de máquinas síncronas
- 5.2.4- Ecuaciones de la máquina síncrona como generador
- 5.2.5- Característica de vacío
- 5.2.6- Característica de cortocircuito
- 5.2.7- Impedancia síncrona no saturada
- 5.2.8- Balance de potencias de un generador síncrono

5.3- MODELO DEL GENERADOR

- 5.3.1- Elección del modelo del generador
- 5.3.2- Sustitución de L_d y L_q por L_S
- 5.3.3- Constante de la máquina (K o $V_{PK}/krpm$)
- 5.3.4- Modelo completo del generador

5.4- CARACTERIZACIÓN DEL GENERADOR

- 5.4.1- Resistencia del estator R_S
- 5.4.2- Número de pares de polos p
- 5.4.3- Ensayo de vacío
- 5.4.4- Constante de la máquina (K o $V_{PK}/krpm$)
- 5.4.5- Ensayo de cortocircuito
- 5.4.6- Inductancia síncrona L_S

6- COMPONENTES DEL SISTEMA: RECTIFICADOR

6.1- DESCRIPCIÓN DEL RECTIFICADOR

6.2- FUNCIONAMIENTO Y ECUACIONES DEL RECTIFICADOR

- 6.2.1- Conducción en la mitad superior del puente
- 6.2.2- Conducción en la mitad inferior del puente
- 6.2.3- Tensión de salida

6.3- MODELO DEL RECTIFICADOR

7- COMPONENTES DEL SISTEMA: BATERÍA

7.1- DESCRIPCIÓN DE LA BATERÍA

7.2- FUNCIONAMIENTO Y ECUACIONES DE LA BATERÍA

- 7.2.1- Procesos químicos en las baterías de plomo-ácido
- 7.2.2- Carga máxima Q_{max}
- 7.2.3- Estado de carga SOC
- 7.2.4- Tensión de circuito abierto U_{OC}
- 7.2.5- Capacidad equivalente de la batería C_{bat}
- 7.2.6- Resistencia de descarga R_d
- 7.2.7- Resistencia de descarga R_c
- 7.2.8- Resistencia de la batería R_{bat} en función de SOC
- 7.2.9- Tensión de la batería U_{bat}

7.3- MODELO DE LA BATERÍA

7.4- CARACTERIZACIÓN DE LA BATERÍA

- 7.4.1- Ensayo de descarga continua
- 7.4.2- Carga máxima Q_{max}
- 7.4.3- Ensayo de descarga discontinua
- 7.4.4- Estado de carga SOC
- 7.4.5- Tensión de circuito abierto U_{OC} en función de SOC
- 7.4.6- Resistencia de la batería R_{bat} en función de SOC
- 7.4.7- Capacidad interna equivalente C_{bat}

8- CONDENSADORES

9- MODELO COMPLETO

9.1- OBTENCIÓN DE C_{bat}

10- AJUSTE DEL SISTEMA

10.1- VARIABLES A CONSIDERAR

- 10.1.1- Variables que afectan al rendimiento del sistema
- 10.1.2- Velocidad del viento v
- 10.1.3- Relación de transmisión RT
- 10.1.4- Estado de carga SOC
- 10.1.5- Número de combinaciones analizar

10.2- VALORES A ANALIZAR

- 10.2.1- Velocidad del viento v
- 10.2.2- Relación de transmisión RT
- 10.2.3- Condensadores C

10.3- SIMULACIONES CON VELOCIDAD DEL VIENTO v CONSTANTE

10.4- ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

- 10.4.1- Análisis según valores de RT
- 10.4.2- Máximas potencias en el generador
- 10.4.3- Ponderación de resultados según velocidad de viento
- 10.4.4- Resultado final
- 10.4.5- Revisión de cálculos realizados a partir de RT'

11- SIMULACIONES CON VIENTO REAL

11.1- VELOCIDADES DE VIENTO BAJAS CON $RT = 10$ Y $C = 150\mu F$

- 11.1.1 Análisis de las velocidades registradas
- 11.1.2 Resultados de la simulación
- 11.1.3 Valoración del resultado de C_P
- 11.1.4 Valoración del resultado de P_v , P_g y E_g
- 11.1.5 Valoración del resultado de I_{bat} y SOC

11.2- VELOCIDADES DE VIENTO BAJAS SIN CONDENSADORES

- 11.2.1 Resultados de la simulación
- 11.2.2 Valoración del resultado de C_P
- 11.2.3 Valoración del resultado de P_v , P_g y E_g
- 11.2.4 Valoración del resultado de I_{bat} y SOC

11.3- VELOCIDADES DE VIENTO ALTAS CON $RT = 10$ Y $C = 150\mu F$

- 11.3.1 Análisis de las velocidades registradas
- 11.3.2 Resultados de la simulación
- 11.3.3 Valoración del resultado de C_P
- 11.3.4 Valoración del resultado de P_v , P_g y E_g
- 11.3.5 Valoración del resultado de I_{bat} y SOC

11.4- VELOCIDADES DE VIENTO ALTAS SIN CONDENSADORES

11.4.1 Resultados de la simulación

11.4.2 Valoración del resultado de C_P

11.4.3 Valoración del resultado de P_v , P_g y E_g

11.4.4 Valoración del resultado de I_{bat} y SOC

12- CONCLUSIONES GENERALES

1- OBJETIVO

En muchas zonas remotas de algunos países en vías de desarrollo no existe ninguna conexión con la red eléctrica, con las desventajas en el desarrollo de las tareas diarias que ello conlleva para sus habitantes. Es posible mejorar notablemente la calidad de vida de estas personas instalando sistemas que permitan generar electricidad de forma aislada en la propia zona.

Hasta la fecha se han llevado a cabo diversos proyectos con este objetivo en distintas zonas del mundo, y para lograrlo se han empleado diferentes sistemas. Generalmente todos ellos tienen en común la forma en la que se realiza el consumo eléctrico en los hogares (mediante el uso de baterías), aunque difieren en cuanto a la manera de alimentar dichas baterías. Una opción muy empleada es la alimentación de baterías mediante generadores diésel. Posee el inconveniente de que la población debe abastecerse periódicamente de dicho combustible, lo cual es complicado en el caso de pequeñas comunidades muy alejadas de núcleos urbanos mayores. Otra opción es la instalación de paneles fotovoltaicos ubicados en la propia comunidad, lo cual permite a sus habitantes ganar una mayor independencia. Sin embargo, a menudo el coste de estos paneles resulta excesivo para sus usuarios, por lo que esta opción es muy difícil de implementar sin ayuda económica del exterior.

Debido a las desventajas que presentan los dos sistemas anteriores, una tercera ha ganado peso en los últimos años: se trata del empleo de pequeños aerogeneradores. Estos tienen por lo general un coste menor que el de los paneles fotovoltaicos. A su vez la población logra mantener su independencia energética, debido a que el viento es un recurso renovable y disponible (en mayor o menor medida) en todo el mundo. Pero la gran variabilidad de dicho recurso hace también que diseñar y regular este sistema sea mucho más complejo que los anteriores.

El objetivo de este proyecto es diseñar un sistema de generación aislada basado en la combinación de un pequeño aerogenerador tripala y una batería, que permita satisfacer las necesidades mencionadas de forma económica y eficiente. Se estudiarán diferentes alternativas y componentes adicionales que sean capaces de optimizar la potencia extraída por el sistema, teniendo siempre presente la necesidad de no elevar excesivamente el coste de la instalación.

2-INTRODUCCIÓN

Además de la turbina, el generador eléctrico y la batería, el sistema necesitará otros componentes. La turbina gira a muy bajas revoluciones en comparación con la velocidad de giro de cualquier máquina eléctrica, por lo que será necesario colocar una multiplicadora de velocidad entre ambos componentes. Además, el generador eléctrico más sencillo y habitual es la máquina síncrona, que produce corriente alterna, mientras que la batería debe alimentarse con corriente continua. Por lo tanto, será necesario rectificar la señal de salida del generador para poder alimentar la batería.

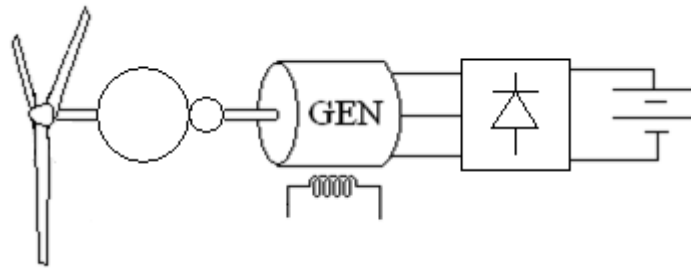


Fig. 2.1: Sistema compuesto de turbina, multiplicadora, generador, rectificador y batería

Con esos componentes ya es posible suministrar corriente a las baterías partiendo de la potencia mecánica de giro de la turbina provocada por el viento. Pero aún no es posible regular el sistema para mejorar su eficiencia. Como se verá más adelante, el rendimiento de la turbina depende de la relación entre la velocidad del viento y la velocidad del giro del aerogenerador. Por lo tanto, se puede optimizar la eficiencia del sistema controlando la velocidad de giro de la turbina. Dicha velocidad variará en función de la tensión y corriente que es demandada al generador. Para modificar esas variables se puede colocar un convertidor electrónico entre el rectificador y la batería: por ejemplo, un convertidor reductor, cuyo ciclo de trabajo determina la relación entre la tensión de entrada y la de salida.

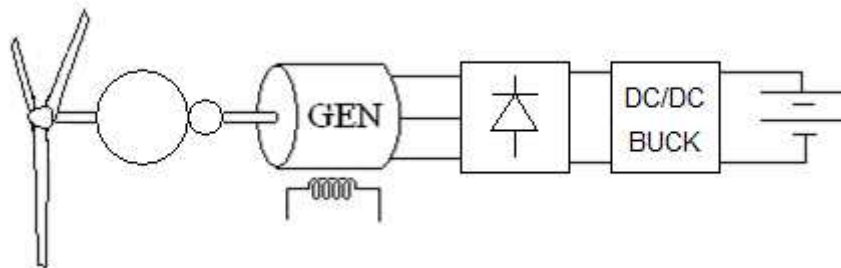


Fig. 2.2: Sistema formado por turbina, multiplicadora, generador, rectificador, reductor y batería

Es posible implementar un sistema de control que modifique el valor del ciclo de trabajo del convertidor en función de la velocidad del viento y el estado de carga de la batería. De esa forma se puede ajustar la velocidad de giro para maximizar el rendimiento y la potencia extraída del viento. Pero un sistema de control como semejante requiere un lazo de regulación y la instalación de sensores (como un anemómetro etc.), que añadidos al convertidor encarecen la instalación y dificultan su manejo y mantenimiento.

Sin embargo, existe una forma más sencilla de optimizar la potencia extraída sin tener que realizar ningún control. La inductancia interna de la máquina hace que se produzca potencia reactiva, la cual a su vez fuerza una reducción de la potencia activa de salida del generador, por lo que la potencia obtenida es menor que la potencia teórica disponible. Cuanto mayor sea la velocidad de giro mayor será la frecuencia, y por lo tanto mayores la reactancia del generador y la disminución provocada en la potencia de salida con respecto de la entrada. Debido a ello, el efecto generado por la inductancia interna se asemeja a la saturación de un material ferromagnético: a velocidades bajas la potencia extraída por un generador síncrono es muy similar a la potencia teórica correspondiente a esas velocidades. A velocidades mayores la potencia extraída comienza a disminuir con respecto de la potencia teórica, y a partir de un cierto valor de velocidad la potencia extraída permanece más o menos constante aunque la velocidad siga aumentando.

Es posible contrarrestar este fenómeno mediante potencia reactiva capacitiva, instalando condensadores a la salida del generador. Esto aumenta la potencia aprovechada, modificando la velocidad de giro de la turbina y permitiendo aumentar de esta forma el rendimiento. Evidentemente, de los condensadores empleados dependerá la potencia reactiva capacitiva existente y el rango de frecuencias para el que se contrarresta la potencia reactiva inductiva de la máquina.

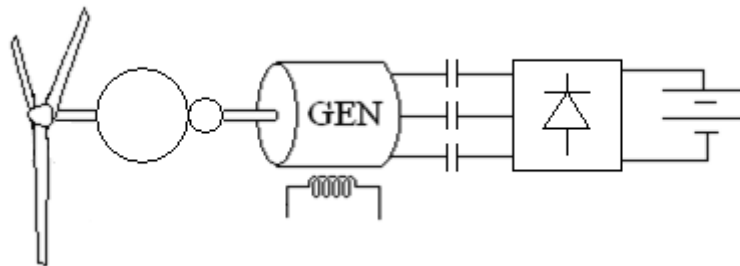


Fig. 2.3: Sistema formado por turbina, multipl., generador, condensadores, rectificador y batería

Una vez que se tiene el modelo completo del sistema, realizando simulaciones para diferentes valores de condensadores se puede averiguar qué valor optimiza la potencia extraída y mejora el rendimiento para las condiciones de funcionamiento más habituales. A diferencia del sistema anterior que poseía un complejo lazo de control, con condensadores no es posible obtener la máxima eficiencia para todos los rangos de funcionamiento. Sin embargo, los condensadores son notablemente más económicos y el sistema resultante es mucho más sencillo. Además, si se escogen los valores adecuados de capacidad se puede mejorar considerablemente la potencia obtenida para el rango de velocidades deseado. Por ello, esta última opción será la que se lleve a cabo en el análisis a realizar. Una vez modelado el sistema completo y caracterizados todos los parámetros de sus componentes, se estudiarán diferentes condensadores y el efecto que provocan en la potencia extraída para poder escoger el valor de capacidad más adecuado.

3 - COMPONENTES DEL SISTEMA: TURBINA

3.1- DESCRIPCIÓN DE LA TURBINA

Se ha considerado un pequeño aerogenerador tripala de 2m de diámetro de superficie de barrido de las palas.

Los aerogeneradores tripala de esas dimensiones son capaces de producir habitualmente alrededor de 1000W nominales. Véase el ejemplo de la figura 3.1 de un aerogenerador comercial de características similares:

WHISPER 100

Technical Specifications

WHISPER 100	
Rotor Diameter	7 feet / 2.1 meters
Weight	47 lbs / 21 kg box: 74 lbs / 22.56 kg
Shipping Dimensions	51 x 20 x 13" / 1295 x 508 x 330 mm
Mount	2.5" schedule 40 / 6.35 cm pipe
Start-Up Wind Speed	7.5 mph / 3.4 m/s
Voltage	12, 24, 36, 48 VDC
Rated Power	900 watts at 28 mph / 12.5 m/s
Turbine Controller	Whisper controller
Body	Cast aluminum/marine option available
Blades	3-Polypro/carbon glass reinforced
Overspeed Protection	Patented side-furling
Kilowatt Hours Per Month	100 kWh/mo at 12 mph / 5.4 m/s
Survival Wind Speed	120 mph / 55 m/s
Warranty	5 year limited warranty




Fig. 3.1: Pequeño aerogenerador tripala comercial

En la fase inicial de este proyecto se valoró la fabricación física de la turbina, pero esto conllevaría la necesidad de hacer un profundo análisis aerodinámico previo, aspecto sobre el cual no hemos recibido formación durante la carrera.

Se barajó después la posible compra de un modelo comercial similar al de la figura. Pero finalmente se descartó también esta idea, debido por un lado a que era posible modelizar una turbina parecida a las reales sin necesidad de poseerla físicamente, y por otro a que en la realización de los ensayos se podía simular el comportamiento de la turbina mediante una máquina de corriente continua del laboratorio de máquinas eléctricas funcionando como motor.

Los valores necesarios para parametrizar el modelo la turbina se han obtenido estudiando los valores típicos de dichas variables en aerogeneradores con características similares, como se verá más adelante.

3.2- FUNCIONAMIENTO Y ECUACIONES DE LA TURBINA

3.2.1- LÍMITE DE BETZ

Las leyes de la física impiden que se pueda extraer toda la potencia disponible en el viento a su paso por el rotor de un aerogenerador. Parte de la potencia disponible es desaprovechada debido a pérdidas aerodinámicas (turbulencias generadas), mecánicas (de rozamiento), eléctricas (efecto Joule) o magnéticas.

Sin embargo, aún suponiendo que se tuvieran unas condiciones ideales en las que ninguna de estas pérdidas se produjera, tampoco sería posible extraer el 100% de la potencia eólica que atraviesa un aerogenerador, como se verá a continuación.

La máxima potencia teórica aprovechada la define la Ley de Betz, desarrollada en 1919 por el físico alemán Albert Betz. Según esta ley, un aerogenerador no podrá nunca captar más del 59,3% de la energía cinética del viento. El factor 0,593 se conoce como Límite de Betz. Representa la máxima fracción de potencia que se puede capturar de una corriente de viento. Si a este factor se le añaden las pérdidas mencionadas anteriormente, se obtiene que el rendimiento máximo real de los aerogeneradores es de alrededor de un 40% (dependerá también del modelo de aerogenerador, como se verá más adelante).

Para demostrar la Ley de Betz, supondremos que tenemos un aerogenerador ideal consistente en un disco que absorbe la energía cinética del viento a su paso, de manera que tras haberlo atravesado el viento fluye a una velocidad inferior. Se asumirán las siguientes condiciones:

a) El rotor no posee buje, y su número de palas es infinito. Las palas a su vez no ofrecerán ninguna resistencia al viento (cualquier carga adicional haría disminuir el rendimiento por debajo del límite de Betz, como ocurre en la realidad). El rotor no tendrá masa alguna.

b) El viento que fluye a través del rotor lo hace en dirección axial. El cálculo que se va a realizar es de análisis de volumen, y para hallar una solución al mismo el volumen controlado debe contener todo el fluido que entra y sale del aerogenerador.

c) El viento se considerará un fluido incompresible. Se descartan pérdidas de presión, la densidad del aire permanecerá constante y no se considerará ninguna transferencia de calor de las palas del aerogenerador al viento o viceversa.

Aplicando la ley de conservación de masa a control de volumen, se puede hallar el flujo másico (o masa de flujo fluyendo por unidad de tiempo) como:

$$\dot{m} = \rho \cdot A_1 \cdot v_1 = \rho \cdot S \cdot v = \rho \cdot A_2 \cdot v_2 \quad (3.1)$$

Donde v_1 es la velocidad del viento antes de atravesar el rotor, y v_2 es la velocidad del viento tras haber atravesado el rotor. ρ es la densidad del fluido, y S el área de barrido de las palas.

La fuerza obtenida del viento por el rotor puede definirse como:

$$F = m \cdot a = m \cdot \frac{dv}{dt} = \dot{m} \cdot \Delta v = \rho \cdot S \cdot v \cdot (v_1 - v_2) \quad (3.2)$$

El trabajo realizado por esta fuerza se define incrementalmente como:

$$dE = F \cdot dx \quad (3.3)$$

La potencia del viento P_V se puede obtener derivando la expresión anterior:

$$P_V = \frac{dE}{dT} = F \cdot \frac{dx}{dt} = F \cdot v \quad (3.4)$$

Introduciendo la expresión de la fuerza F de la ecuación 3.2 en la ecuación 3.4 se obtiene la expresión para la potencia extraída del viento:

$$P_V = \rho \cdot S \cdot v^2 \cdot (v_1 - v_2) \quad (3.5)$$

Sin embargo, la potencia puede representarse también de otra manera: empleando la fórmula de la energía cinética. Aplicando la ecuación de la conservación de la energía al volumen de control se obtiene:

$$P_V = \frac{\Delta E}{\Delta t} = \frac{1}{2} \cdot \dot{m} \cdot (v_1^2 - v_2^2) \quad (3.6)$$

Sustituyendo la expresión del flujo másico (ecuación 3.1) en la ecuación 6 se obtiene:

$$P_V = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v \cdot (v_1^2 - v_2^2) \quad (3.7)$$

Se han obtenido dos expresiones diferentes para representar la potencia, una examinando el incremento de trabajo realizado y la otra a partir de la conservación de la energía. Igualando ambas expresiones se obtiene:

$$P_V = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v \cdot (v_1^2 - v_2^2) = \rho \cdot S \cdot v^2 \cdot (v_1 - v_2) \quad (3.8)$$

El desarrollo de la anterior igualdad conduce a la siguiente conclusión:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \cdot (v_1^2 - v_2^2) &= \frac{1}{2} \cdot (v_1 \cdot v_2) \cdot (v_1 + v_2) = v \cdot (v_1 - v_2) \quad \rightarrow \\ \rightarrow \quad v &= \frac{1}{2} \cdot (v_1 + v_2) \end{aligned} \quad (3.9)$$

Es decir, la velocidad del viento en el rotor se puede considerar la media de las velocidades del viento antes y después de atravesarlo.

Volviendo a la expresión anterior de la potencia basada en la energía cinética (ecuación 3.6), se puede realizar el siguiente desarrollo:

$$\begin{aligned}\dot{E} &= \frac{1}{2} \cdot \dot{m} \cdot (v_1^2 - v_2^2) = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot (v_1^2 - v_2^2) = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v \cdot (v_1^2 - v_2^2) = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot S \cdot (v_1 + v_2) \cdot (v_1^2 - v_2^2) = \\ &= \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot S \cdot v_1^3 \cdot \left(1 - \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^2 + \left(\frac{v_2}{v_1} \right) - \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^3 \right)\end{aligned}\quad (3.10)$$

Si a partir de la expresión obtenida se diferencia \dot{E} con respecto a v_2/v_1 mediante la ley de la cadena, para un determinado valor de velocidad de fluido v_1 y un valor de área S se obtiene un máximo de \dot{E} . El máximo valor se alcanza cuando v_2/v_1 equivale a $1/3$. Sustituyendo $1/3$ en la ecuación 3.10 se obtiene la expresión de la potencia máxima teórica:

$$P_{V_{\max}} = \frac{16}{27} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v_1^3 \quad (3.11)$$

En conclusión, la potencia obtenible de un cilindro de fluido de sección S y velocidad de fluido v_1 se representa mediante la ecuación 3.12:

$$P_v = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v_1^3 \cdot C_p \quad (3.12)$$

El Coeficiente de potencia C_p posee un valor máximo $C_{p_{\max}}$ de $16/27$, o lo que es lo mismo $0,593$. Este valor es conocido como el Límite de Betz.

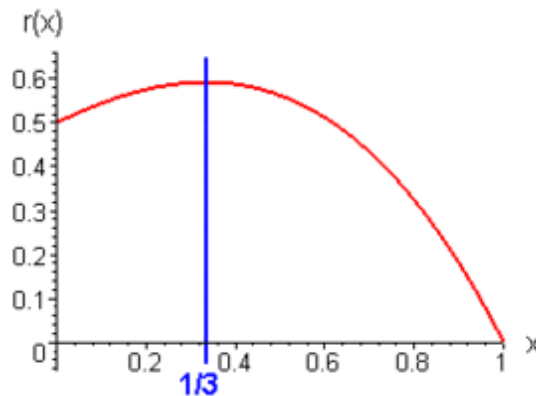


Fig. 3.2: Coeficiente de potencia C_p frente al ratio v_2/v_1

Las pérdidas en el rotor son las más significativas de todas las producidas en un aerogenerador, por lo que es importante tratar de reducirlas tanto como sea posible. En los aerogeneradores modernos es posible alcanzar valores de C_p situados en un rango de entre $0,4$ y $0,5$, lo que representa en torno al 70% - 80% de la potencia máxima teórica obtenible.

Nótese que el análisis realizado no depende de la geometría, de forma que S podría en realidad tomar cualquier forma, puesto que el fluido atraviesa el volumen de control axialmente desde la entrada hasta la salida, y a su vez las velocidades de entrada y salida en el volumen son uniformes.

Nótese también que cualquier efecto extraño no contemplado en este análisis sólo podría disminuir el rendimiento, ya que el análisis se ha hecho en condiciones ideales, sin considerar la fricción etc.

Como se observa en la ecuación 3.12, la potencia obtenida depende siempre del cubo de la velocidad del viento.

Observación: la velocidad media se puede representar mediante esta otra expresión:

$$V_{media} = \frac{2}{\frac{1}{v_1} + \frac{1}{v_2}} = \frac{2 \cdot V_1 \cdot V_2}{V_1 + V_2} \quad (3.13)$$

En este caso, si v_2 vale 0, para cualquier valor de v_1 la media será también 0 (se corresponde con el caso de impacto sobre la turbina sin que haya movimiento).

3.2.2- OTROS MODELOS PARA HALLAR C_{Pmax}

Posteriormente a la propuesta hecha por Betz, se han hallado nuevos modelos que incluyen algunas aproximaciones más a la realidad, y algunos factores que Betz no tuvo en cuenta en su modelo. Sin embargo, los resultados obtenidos en esos modelos son muy similares al Límite de Betz, mientras que las ecuaciones planteadas por Betz son mucho más sencillas.

Debido a que el modelo de Betz reúne sencillez y fiabilidad suficientes, en este proyecto se emplearán sus ecuaciones para la realización de cálculos y obtención del modelo de la turbina, aunque en este apartado se expondrán brevemente los principales modelos alternativos.

En 1935 H. Glauert halló una nueva expresión para el rendimiento de la turbina que tenía en consideración el componente angular de la velocidad. Para ello se basó en un balance energético sobre el plano del rotor. A partir del modelo obtenido por Glauert, el rendimiento se sitúa en realidad siempre bajo el límite de Betz, y se acerca al mismo de manera asintótica conforme el ratio de velocidades punta se acerca al infinito.

En 2001, Gorban, Gorlov y Silantyev crearon un nuevo modelo llamado GGS, que considera una distribución de presión no uniforme y un flujo curvilíneo a través del plano de la turbina (consideraciones no hechas antes en el cálculo de Betz). El modelo GGS predice que el rendimiento máximo obtenible es de un 61%, muy similar al obtenido por Betz.

En los últimos años, se ha empleado un nuevo modelo de simulación numérica directa (DNS por sus siglas en inglés) basado en dinámica computacional de fluidos (CFD) para modelizar el comportamiento de turbinas eólicas. Los modelos obtenidos han resultado ser muy similares a los experimentos reales. El rendimiento máximo teórico obtenido mediante este modelo se sitúa típicamente entre el límite de Betz y el modelo GGS.

3.2.3- RATIO DE VELOCIDADES λ Y COEFICIENTE DE POTENCIA C_P

Se ha explicado previamente que, debido a las restricciones físicas, el C_{Pmax} real de un aerogenerador se sitúa siempre por debajo del Límite de Betz (Equivalente al C_{Pmax} de un aerogenerador ideal), siendo habitualmente entre un 70%-80% del mismo. Sin embargo, esto no significa que un aerogenerador pueda emplear ese C_{Pmax} en cualquier régimen de funcionamiento. El rendimiento depende también de la relación entre la velocidad del viento y la de la turbina.

A la relación entre la velocidad del viento v y la velocidad en la punta de las palas de la turbina se le denomina λ . La velocidad en la punta de las palas puede expresarse también como el producto entre la velocidad de giro de la turbina ω y la longitud de pala L , aproximadamente equivalente al radio del área de barrido del rotor R .

$$\lambda = \frac{\omega \cdot L}{v} \quad (3.14)$$

C_P alcanza su valor máximo sólo para un determinado valor de λ (conocido habitualmente como $\lambda_{\text{óptima}}$ o λ^*). Es decir, sólo con λ igual a λ^* se alcanzará el rendimiento máximo, y se extraerá del viento toda la potencia que es posible obtener para un aerogenerador dado que tiene unas restricciones físicas dadas.

El objetivo de este proyecto consiste en diseñar un sistema de control sobre el aerogenerador y sus componentes que permita hacer girar a la turbina a una velocidad ω que se vaya adecuando a los cambios producidos en el tiempo de la velocidad del viento v , de tal manera que para cualquier velocidad del viento, el ratio de velocidades λ sea siempre igual a λ^* . Como consecuencia, se obligará al aerogenerador a funcionar en el régimen de trabajo que produzca la potencia máxima físicamente posible en cada momento.

En la gráfica de la figura 3.3 se representan algunas curvas típicas de C_P frente a λ para diferentes modelos de aerogeneradores. Cada modelo tiene sus propios valores de λ^* y sus propios valores de C_{Pmax} .

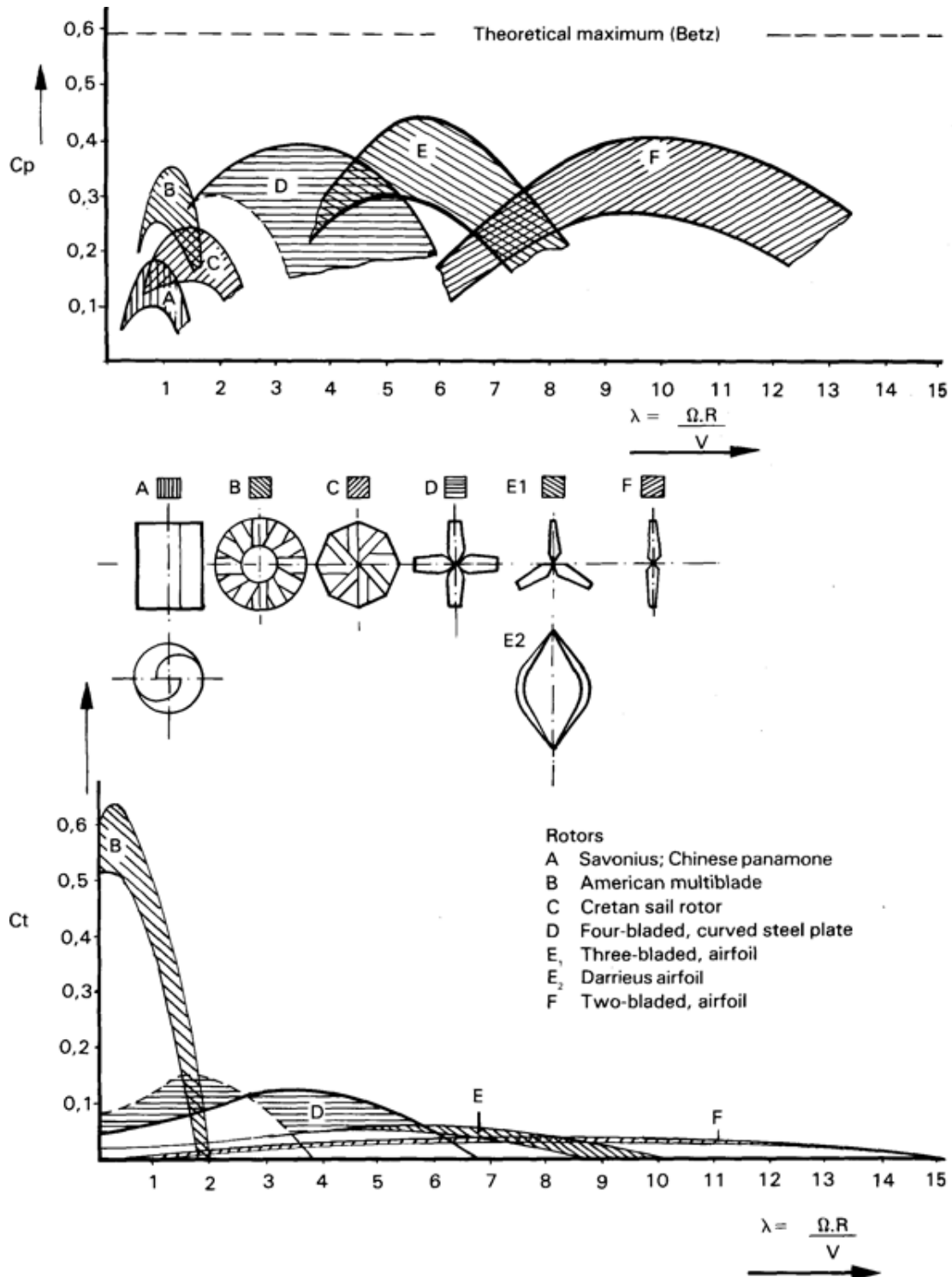


Fig. 3.3: Curvas típicas de C_p frente a λ según el modelo de aerogenerador

La curva C_p - λ que se necesita estará comprendida en la región E de la figura, correspondiente a los aerogeneradores tripala. Poseerá una forma parabólica, donde habrá que hallar los parámetros a, b y c:

$$C_p = a \cdot \lambda^2 + b \cdot \lambda + c \quad (3.15)$$

3.2.4- SECCIÓN DE PALA: TIPOS DE PERFILES

Existen varios modelos de perfiles estándares para palas de turbinas que se emplean en diversas aplicaciones además de en aerogeneradores (como aviones, barcos etc.). Desde mediados del siglo XX existen importantes catálogos publicados que definen la geometría de un perfil y sus curvas aerodinámicas. Durante la Primera Guerra Mundial, los ensayos realizados en Gottingen contribuyeron al diseño de los primeros perfiles modernos.

Sin embargo, a partir de la Segunda Guerra Mundial, tomó el relevo en los Estados Unidos el Comité Nacional de Aeronáutica (NACA), antecesor de la actual NASA, que ha desarrollado la mayor parte de los perfiles empleados en la actualidad. Dichos perfiles siguen conservando su denominación original (NACA), a la cual se acompaña de unos dígitos que determinan la geometría del perfil en relación a la longitud total de la sección, conocida como *cuerda*.

Los perfiles se dividen en distintos grupos en función del número de dígitos que poseen, siendo los perfiles más complejos los de mayor número de dígitos. En aerogeneradores los perfiles más empleados son los NACA asimétricos de cuatro dígitos (principalmente los NACA 4415). Para aerogeneradores de grandes potencias se suelen utilizar a veces perfiles más complejos como el NACA 63-215, con el cual se obtienen mayores rendimientos.

En el presente proyecto se utilizará el modelo de perfil de pala más convencional en pequeños y medianos aerogeneradores, el NACA 4415.

3.2.5- SECCIÓN DE PALA: PERFILES NACA DE 4 DÍGITOS

Para entender la geometría de un perfil NACA es necesario conocer la línea cuyos puntos son siempre equidistantes con respecto a las superficies superior e inferior del perfil. Esta línea se denomina *línea media* o *camber line* y define en gran medida las características del perfil.

En perfiles simétricos (de tipo NACA 00XX) la camber line es una línea recta que coincide con la línea que une ambos extremos del perfil. En perfiles asimétricos la camber line es una línea curva que lógicamente no coincide con la línea que une los extremos (ver figura 3.4).

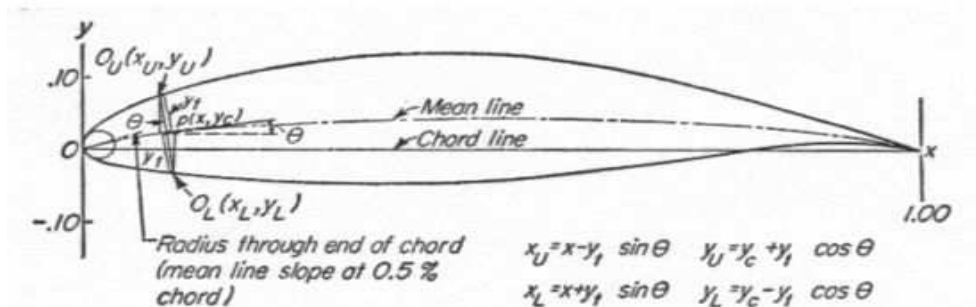


Fig. 3.4: Perfil asimétrico NACA de 4 dígitos

A continuación se explicará qué representan cada uno de esos 4 dígitos, para lo que se supondrá un perfil tipo NACA $mpth$ (donde m , p , t y h son los dígitos).

El primer dígito m representa la distancia máxima entre la camber line y la línea recta que une los dos extremos del perfil. Este valor se muestra como un porcentaje con respecto a la cuerda del perfil c (longitud total). Es decir, si por ejemplo primer dígito es 2, entonces $m=0,02$: la separación máxima entre la camber line y la línea recta que une los extremos es un 2% de la cuerda total c .

El segundo dígito p representa en decenas la posición en la que se encuentra dicha separación máxima m . Es decir, si el segundo dígito es 3, entonces $p=0,3$: el punto de máxima separación se sitúa en un 30% de la longitud total del perfil, comenzando desde el extremo de ataque. Esto explica porqué los perfiles simétricos empiezan por 00.

Los dos últimos dígitos t y h representan la anchura máxima que alcanza el perfil, mostrado también como un porcentaje de la cuerda c . Es decir, si por ejemplo esos dígitos son 1 y 2, la anchura máxima del perfil será un 12% de c .

3.2.6- SECCIÓN DE PALA: ECUACIONES PARA EL CÁLCULO DEL PERFIL

A partir de los valores m , p , t y h se pueden calcular los puntos de la camber line (x_c, y_c) mediante la siguiente fórmula:

$$y_c = \begin{cases} \frac{m}{p^2} \cdot (2px_c - x_c^2) & 0 < x_c < p \\ \frac{m}{(1-p)^2} \cdot (1-2p+2px_c - x_c^2) & p < x_c < c \end{cases} \quad (3.16)$$

Una vez que se tiene la camber line, es posible hallar la distribución de espesor por encima $(x_{th}, +y_{th})$ y por debajo $(x_{th}, -y_{th})$ de la misma. Puesto que la camber line es la línea equidistante entre las superficies superior e inferior, las distribuciones de espesor por encima y por debajo son iguales, y se calculan mediante la siguiente fórmula:

$$\pm y_{th} = \frac{10t+h}{0,2} \cdot (0,2969\sqrt{x_{th}} - 0,1260x_{th} - 0,3516x_{th}^2 + 0,2843x_{th}^3 - 0,1015x_{th}^4) \quad (3.17)$$

Finalmente, los puntos de la superficie superior (x_s, y_s) e inferior $(x_i, +y_i)$ del perfil se calculan mediante las siguientes fórmulas:

$$x_s = x_c - y_{th} \cdot \sen\theta \quad (3.18)$$

$$y_s = y_c + y_{th} \cdot \cos\theta \quad (3.19)$$

$$x_i = x_c + y_{th} \cdot \sen\theta \quad (3.20)$$

$$y_i = y_c - y_{th} \cdot \cos\theta \quad (3.21)$$

Donde Θ es:

$$\theta = \arctan\left(\frac{dy_c}{dx_c}\right) \quad (3.22)$$

3.2.7- CUERDA c_n

La pala de un aerogenerador se divide habitualmente en dos tramos muy diferenciados:

-Tramo 1: es la base de la pala, la parte más cercana al buje y la más pequeña (habitualmente supone alrededor de una quinta parte de la longitud total de la pala L). Posee una sección de forma aproximadamente elíptica.

-Tramo 2: es la parte principal de la pala, desde el final del tramo 1 hasta la punta. La sección de este tramo se corresponde habitualmente con alguno de los perfiles NACA estudiados anteriormente. La cuerda de dicha sección se va reduciendo paulatinamente desde la base hacia la punta.

Debido a esa reducción de la cuerda conforme nos vamos alejando de la base de la pala, el tamaño de la sección va disminuyendo poco a poco, de manera que las palas poseen infinitos valores de cuerda e infinitos tamaños de sección.

Para simplificar la geometría se dividirá cada pala en pequeñas partes de igual longitud. Cada una de esas partes se considerará un prisma cuya cuerda y sección serán continuas a lo largo de toda su longitud. Es decir, la pala estará formada por N partes, y cada una de esas partes poseerá un valor de cuerda y un tamaño de sección determinados. Evidentemente, la cuerda de cada una de esas partes será algo menor que la de la parte anterior, hasta llegar a la punta.

Para referirnos a esas partes o secciones las enumeraremos, de tal forma que cuando nos refiramos a una parte o sección cualquiera sin especificar la llamaremos sección n , donde n podrá ser 1, 2, 3... N .

Los valores de cuerda c_n de cada una de esas N secciones se obtendrán a partir de otros ejemplos de palas similares, adaptado los datos del ejemplo a nuestra configuración.

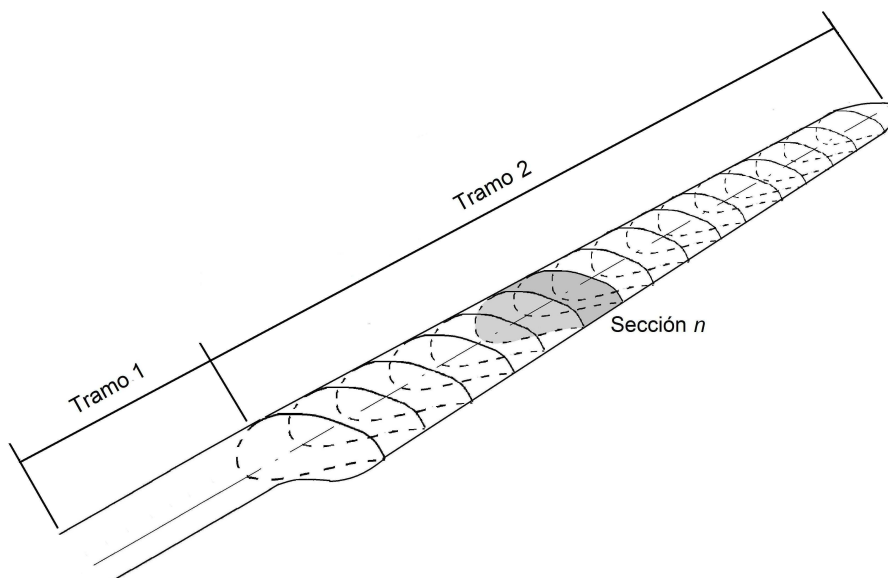


Fig. 3.5: Pala dividida tramos 1 y 2, y este 2º tramo en N secciones de cuerda c_n constante

3.2.8- MOMENTO DE INERCIA DE LAS PALAS DE LA TURBINA J_P

A la hora de calcular el momento de inercia de una pala con respecto a su eje de giro, la aportación realizada por el tramo 1 se puede considerar despreciable con respecto a la aportación realizada por el tramo 2. Hay tres razones por las que se puede considerar despreciable dicho valor:

- a) La longitud del tramo 1 es mucho menor que la del tramo 2, por lo que su volumen y su masa son mucho menores.
- b) La sección del tramo 1 también es considerablemente más pequeña que la del tramo 2.
- c) El tramo 1 es el más cercano al punto de giro, de manera que su momento de inercia será mucho menor que el correspondiente al tramo 2 (nótese que el momento de inercia depende del cuadrado de la distancia con respecto al eje de giro).

En definitiva, el momento de inercia de una pala con respecto al eje de giro se considerará igual al momento de inercia del tramo 2 exclusivamente.

Para poder calcular el momento de inercia de una pala con respecto al eje de giro, se ha supuesto que dicho eje se corta con la línea que une los puntos de la pala en los cuales la cuerda es máxima. Este supuesto permitirá calcular con facilidad el momento de inercia de cada una de las N secciones y la aplicación posterior del teorema de Steiner, como se verá a continuación.

En la figura inferior se muestran ambos ejes: la línea que une los puntos en los que la cuerda es máxima (eje C) y el eje de giro (eje X).

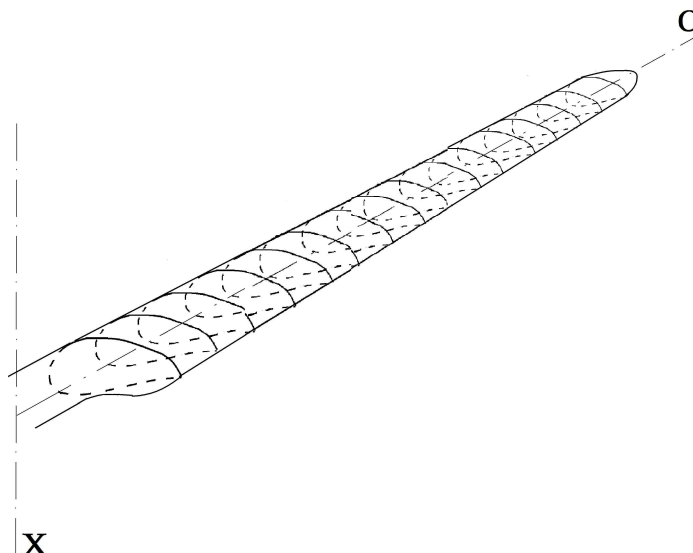
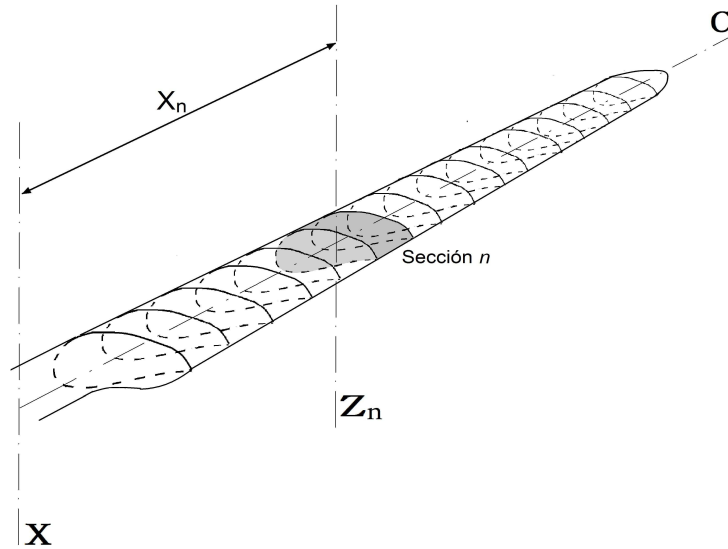


Fig. 3.6: Eje que une los puntos de cuerda máxima C y eje de giro X de una pala

Para calcular el momento de inercia de cada una de las N secciones de la pala se emplearán N ejes adicionales paralelos al eje de giro X. Cada uno de esos ejes atravesará el centro de una de las N partes de la pala.

Fig. 3.7: Eje Z_n paralelo al eje de giro X y correspondiente a la sección n

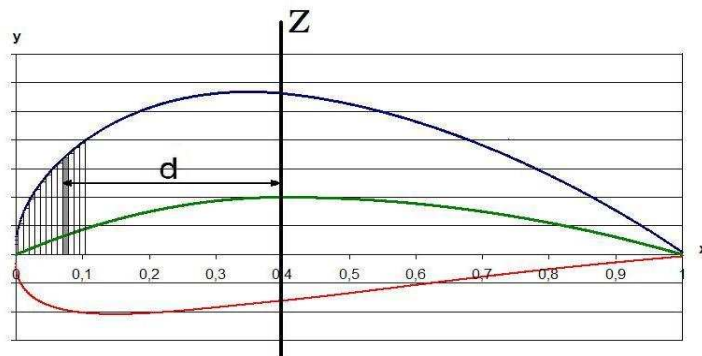
Esos N ejes paralelos al eje de giro X se denominarán Z_n . La distancia entre cada uno de esos ejes y el eje de giro X se denominará x_n .

La ecuación general del momento de inercia posee la siguiente expresión:

$$J = \int d^2 \cdot dm \quad (3.23)$$

Donde J es el momento de inercia de las palas, dm es un diferencial de masa y d es la distancia desde dicho diferencial de masa hasta el eje de cálculo. Para poder calcular el momento de inercia de la turbina se deberá desarrollar dicha expresión mediante el siguiente proceso, consistente en cuatro pasos:

- 1) Calcular el momento de inercia de cada sección n con respecto a su eje Z_n .

Fig. 3.8: División de la sección superior en áreas rectangulares y distancia de una de ellas a Z_n

Partiendo de los puntos del perfil NACA (que van desde 0 hasta el valor de cuerda c_n) se dividirán la mitad superior e inferior de cada sección en pequeñas áreas rectangulares. Esto permitirá sustituir el diferencial de la expresión del momento de inercia por un incremento y la integral por un sumatorio:

$$J_{Z_n} = \int d^2 \cdot dm = \sum_{i=0}^{c_n} d_i^2 \cdot \Delta m_i = \sum_{i=0}^{c_n} d_i^2 \cdot \Delta V_i \cdot \rho_p = \sum_{i=0}^{c_n} d_i^2 \cdot \Delta A_i \cdot l_n \cdot \rho_p \quad (3.24)$$

- J_{Z_n} es el momento de inercia con respecto al eje Z_n de la sección n
- ΔA_i son los incrementos de área rectangulares de la sección n
- l_n es la longitud de la sección n
- ρ_P es la densidad del material de las palas
- d_i es la distancia desde cada diferencial de área ΔA_i hasta el eje Z_n .

Como se tienen los puntos (x_U, y_U) para el perfil superior y los puntos (x_L, y_L) para el perfil inferior, se dividirán las áreas ΔA_i en dos partes de forma que:

$$J_{Z_n} = \sum_{i=0}^{c_n} d_{Ui}^2 \cdot \Delta A_{Ui} \cdot l_n \cdot \rho_P + \sum_{i=0}^{c_n} d_{Li}^2 \cdot \Delta A_{Li} \cdot l_n \cdot \rho_P \quad (3.25)$$

- ΔA_{Ui} son las áreas rectangulares superiores de la sección n
- ΔA_{Li} son las áreas rectangulares inferiores de la sección n
- d_{Ui} es la distancia desde cada área rectangular superior ΔA_{Ui} hasta el eje Z_n
- d_{Li} es la distancia desde cada área rectangular inferior ΔA_{Li} hasta el eje Z_n

Los puntos (x_U, y_U) y (x_L, y_L) representan un porcentaje de la cuerda. Para obtener las áreas ΔA_i se deben emplear valores absolutos de dichos puntos y no porcentajes, siendo por tanto necesario multiplicar los porcentajes dados por el valor de cuerda c_n correspondiente a la sección n con la que se esté trabajando:

$$\Delta A_{Ui} = (x_{Ui+1} \cdot c_n - x_{Ui} \cdot c_n) \cdot (y_{Ui+1} \cdot c_n - y_{Ui} \cdot c_n) = (x_{Ui+1} - x_{Ui}) \cdot (y_{Ui+1} - y_{Ui}) \cdot c_n^2 \quad (3.26)$$

$$\Delta A_{Li} = (x_{Li+1} \cdot c_n - x_{Li} \cdot c_n) \cdot (y_{Li+1} \cdot c_n - y_{Li} \cdot c_n) = (x_{Li+1} - x_{Li}) \cdot (y_{Li+1} - y_{Li}) \cdot c_n^2 \quad (3.27)$$

Por otro lado, las distancias d_i separan las áreas ΔA_i del eje Z_n (que recordamos atraviesa el perfil por el punto donde la cuerda es máxima, m). d_i se halla restando al valor m el promedio de los dos puntos x_i y x_{i+1} que delimitan el área ΔA_i . Pero tanto m como x_i y x_{i+1} son porcentajes de cuerda, luego de nuevo es necesario multiplicar dichos valores por c_n . La distancia d_i se debe indicar además en valor absoluto, de forma que su expresión queda así:

$$d_{Ui} = \left| m \cdot c_n - \frac{(x_{Ui} + x_{Ui+1}) \cdot c_n}{2} \right| \quad (3.28)$$

$$d_{Li} = \left| m \cdot c_n - \frac{(x_{Li} + x_{Li+1}) \cdot c_n}{2} \right| \quad (3.29)$$

Introduciendo las expresiones 3.26, 3.27, 3.28 y 3.29 en la ecuación 3.25:

$$J_{Z_n} = \sum_{i=0}^{c_n} \left| m \cdot c_n - \frac{(x_{Ui} + x_{Ui+1}) \cdot c_n}{2} \right|^2 \cdot [(x_{Ui+1} - x_{Ui}) \cdot (y_{Ui+1} - y_{Ui}) \cdot c_n^2] \cdot l_n \cdot \rho_P + \\ + \sum_{i=0}^{c_n} \left| m \cdot c_n - \frac{(x_{Li} + x_{Li+1}) \cdot c_n}{2} \right|^2 \cdot [(x_{Li+1} - x_{Li}) \cdot (y_{Li+1} - y_{Li}) \cdot c_n^2] \cdot l_n \cdot \rho_P \quad (3.30)$$

2) El valor de inercia hallado en el apartado anterior se corresponde con el de una sección maciza. Como la sección de la pala en realidad es una cáscara hueca por dentro, habrá que restar a cada resultado de JZ_n obtenido en el paso anterior el momento de inercia correspondiente a la zona vacía de la sección n :



Fig. 3.9: Sección de pala hueca

Se considerará que la cuerda de la zona vacía de la sección n (c_{Vn}) es igual a la cuerda de la sección n (c_n) menos dos veces el espesor de la cáscara e :

$$c_{Vn} = c_n - 2 \cdot e \quad (3.31)$$

El momento de inercia de la zona vacía de la sección n con respecto a Z_n será:

$$\begin{aligned} J_{Z_{Vn}} &= \int d_V^2 \cdot dm_V = \sum_{i=0}^{c_{Vn}} d_{Vi}^2 \cdot \Delta m_{Vi} = \sum_{i=0}^{c_{Vn}} d_{Vi}^2 \cdot \Delta V_i \cdot \rho_P = \sum_{i=0}^{c_{Vn}} d_{Vi}^2 \cdot \Delta A_{Vi} \cdot l_n \cdot \rho_P = \\ &= \sum_{i=0}^{c_{Vn}} d_{UVi}^2 \cdot \Delta A_{UVi} \cdot l_n \cdot \rho_P + \sum_{i=0}^{c_{Vn}} d_{LVi}^2 \cdot \Delta A_{LVi} \cdot l_n \cdot \rho_P \end{aligned} \quad (3.32)$$

- $J_{Z_{Vn}}$ es el momento de inercia de la zona vacía de la sección n respecto a Z_n
- ΔA_{UVi} son las áreas rectangulares superiores de la zona vacía de la sección n
- ΔA_{LVi} son las áreas rectangulares inferiores de la zona vacía de la sección n
- d_{UVi} es la distancia desde cada área rectangular superior ΔA_{UVi} hasta el eje Z_n
- d_{LVi} es la distancia desde cada área rectangular inferior ΔA_{LVi} hasta el eje Z_n

Para hallar los valores de ΔA_{Vi} habrá que usar los puntos (x_s, y_s) y (x_i, y_i) multiplicados por la cuerda c_{Vn} . Pero además, para que la zona vacía quede centrada en el interior de la cáscara, habrá que desplazar una distancia e hacia la derecha todos los valores absolutos usados en el eje X . Las áreas ΔA_{Vi} poseen para este caso las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned} \Delta A_{UVi} &= [(x_{Ui+1} \cdot c_{Vn} + e) - (x_{Ui} \cdot c_{Vn} + e)] \cdot (y_{Ui+1} \cdot c_{Vn} - y_{Ui} \cdot c_{Vn}) = \\ &= (x_{Ui+1} - x_{Ui}) \cdot (y_{Ui+1} - y_{Ui}) \cdot c_{Vn}^2 \end{aligned} \quad (3.33)$$

$$\begin{aligned} \Delta A_{LVi} &= [(x_{Li+1} \cdot c_{Vn} + e) - (x_{Li} \cdot c_{Vn} + e)] \cdot (y_{Li+1} \cdot c_{Vn} - y_{Li} \cdot c_{Vn}) = \\ &= (x_{Li+1} - x_{Li}) \cdot (y_{Li+1} - y_{Li}) \cdot c_{Vn}^2 \end{aligned} \quad (3.34)$$

Y las distancias d_{Vi} tendrán las siguientes expresiones:

$$d_{UVi} = \left| m \cdot c_{Vn} - \frac{(x_{Ui} \cdot c_{Vn} + e) + (x_{Ui+1} \cdot c_{Vn} + e)}{2} \right| \quad (3.35)$$

$$d_{LVi} = \left| m \cdot c_{Vn} - \frac{(x_{Li} \cdot c_{Vn} + e) + (x_{Li+1} \cdot c_{Vn} + e)}{2} \right| \quad (3.36)$$

Por lo que la ecuación del momento de inercia queda:

$$J_{ZVn} = \sum_{i=0}^{c_{Vn}} \left| m \cdot c_{Vn} - \frac{(x_{Ui} \cdot c_{Vn} + e) + (x_{Ui+1} \cdot c_{Vn} + e)}{2} \right|^2 \cdot [(x_{Ui+1} - x_{Ui}) \cdot (y_{Ui+1} - y_{Ui}) \cdot c_{Vn}^2] \cdot l_n \cdot \rho_P +$$

$$+ \sum_{i=0}^{c_{Vn}} \left| m \cdot c_{Vn} - \frac{(x_{Li} \cdot c_{Vn} + e) + (x_{Li+1} \cdot c_{Vn} + e)}{2} \right|^2 \cdot [(x_{Li+1} - x_{Li}) \cdot (y_{Li+1} - y_{Li}) \cdot c_{Vn}^2] \cdot l_n \cdot \rho_P \quad (3.37)$$

Se ha considerado que la geometría de la zona vacía es proporcional a la geometría del perfil de la pala (tan sólo se ha reducido $2 \cdot e$ el valor de cuerda). Esta reducción de $2 \cdot e$ en el eje X se trasladará también al eje Y , pero debido a que en sentido vertical la pala es mucho más estrecha, la reducción en Y será menor que $2 \cdot e$. En consecuencia, la cáscara será más fina en las zonas centrales superior e inferior que en los extremos izquierdo (de ataque del viento) y derecho (extremo de cola): el espesor no será homogéneo.

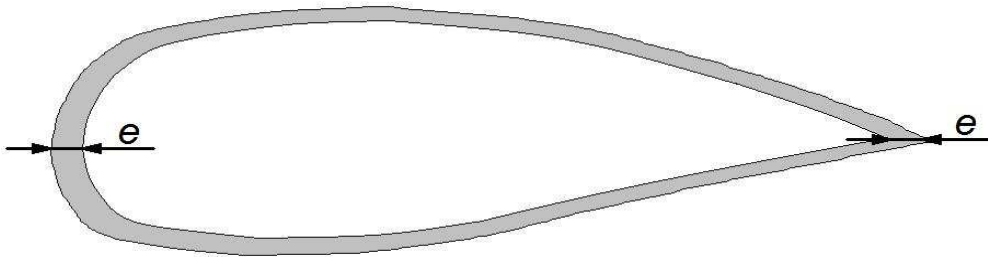


Fig. 3.10: Reducción del espesor desde los extremos hasta el centro de la cáscara

Sin embargo, esta reducción de espesor en el centro es asumible tanto constructivamente como analíticamente:

-Constructivamente es asumible porque las partes centrales sufren mucho menos esfuerzos que los extremos (el extremo izquierdo sufre el ataque del viento y el derecho las turbulencias generadas cuando el viento abandona el perfil). Debido a ello es aceptable que las partes centrales de la cáscara sean más delgadas y menos robustas que los extremos.

-Analíticamente la pérdida de masa en la zona central podría suponer un error en el cálculo del momento de inercia. Pero dicho error es asumible porque son los extremos los que realizan la mayor aportación al momento de inercia, puesto que están más alejados del eje Z_n (y el momento de inercia depende del cuadrado de la distancia).

Por tanto se acepta la falta de homogeneidad en el espesor de la cáscara.

3) Calcular mediante el teorema de Steiner el momento de inercia de cada sección n con respecto al eje de giro X , partiendo de los valores del momento de inercia hallados con respecto a los ejes Z_n . Puesto que el eje de giro X es paralelo a los ejes Z_n y el eje C corta tanto al eje X como a los ejes Z_n es posible aplicar el citado teorema.

Se deberá aplicar N veces el teorema (una vez por cada sección) para hallar el momento de inercia de cada una de las N partes con respecto al eje de giro X . Para ello se debe conocer previamente la masa m_n de cada sección y su distancia x_n con respecto al eje X e introducirlos en la ecuación de Steiner, mostrada a continuación:

$$J_{Xn} = J_{Zn} - J_{ZVn} + m_n \cdot x_n^2 \quad (3.38)$$

La masa total m_n de la sección n se obtiene sumando todos los diferenciales de masa Δm_{Ui} y Δm_{Li} y restándole a los mismos los valores de la zona vacía Δm_{UVi} y Δm_{LVi} :

$$\begin{aligned} m_n &= \sum_{i=0}^{c_n} \Delta m_{Ui} + \Delta m_{Li} - \sum_{i=0}^{cv_n} \Delta m_{UVi} + \Delta m_{LVi} = \\ &= \left[\sum_{i=0}^{c_n} \Delta A_{Ui} + \Delta A_{Li} - \sum_{i=0}^{cv_n} \Delta m_{UVi} + \Delta m_{LVi} \right] \cdot l_n \cdot \rho_P \end{aligned} \quad (3.39)$$

La distancia x_n desde el centro de la sección n hasta el eje de giro X se calcula sumando la longitud del tramo 1 (a la que llamaremos l_{T1}); las longitudes de las secciones comprendidas entre la sección n y el eje de giro X ; y la mitad de la longitud de la sección n :

$$x_n = l_{T1} + l_n \cdot (n-1) + \frac{l_n}{2} = l_{T1} + l_n \cdot (n-0,5) \quad (3.40)$$

En definitiva, la ecuación 4.23 desarrollada queda así:

$$\begin{aligned} J_{Xn} &= J_{Zn} - J_{ZVn} + \\ &+ \left[\sum_{i=0}^{c_n} \Delta A_{Ui} + \Delta A_{Li} - \sum_{i=0}^{cv_n} \Delta m_{UVi} + \Delta m_{LVi} \right] \cdot l_n \cdot \rho_P \cdot [l_{T1} + l_n \cdot (n-0,5)]^2 \end{aligned} \quad (3.41)$$

4) Sumando los momentos de inercia de las N secciones con respecto al eje de giro X se hallará el momento de inercia total de una de las palas. Para obtener el momento de inercia total de la turbina habrá que multiplicar el resultado por el número de palas (es decir, tres):

$$J_P = 3 \cdot \sum_{n=1}^{n=N} J_{Xn} \quad (3.42)$$

3.3- MODELO DE LA TURBINA

La variable de entrada en el modelo de la turbina será la velocidad del viento v .

La ecuación 3.12 ofrece la relación entre la potencia P_V y la velocidad del viento v . Para obtener P_V es necesario conocer algunos parámetros más (C_P , la sección S y densidad del aire ρ), cuyo valor se hallará más adelante.

$$P_V = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v_1^3 \cdot C_P$$

La potencia P_V es igual al producto entre la velocidad del viento al cubo, $1/2$, C_P , S y ρ . La ecuación 3.12 se puede representar en PSIM de la siguiente forma:

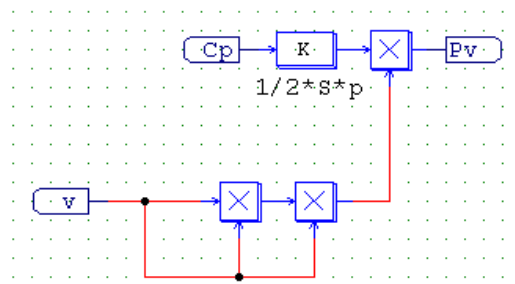


Fig. 3.11: Obtención de P_V a partir de v y C_P

A partir de la ecuación 3.15 se puede hallar C_P como una función parabólica de λ :

$$C_P = a \cdot \lambda^2 + b \cdot \lambda + c$$

Dicha parábola tendrá dos brazos que tenderán a $-\infty$, pero C_P debe estar comprendido siempre entre 0 y C_{Pmax} . Por lo tanto, será necesario colocar un limitador a la entrada de C_P que posea un límite inferior igual a 0.

A su vez, λ depende de la velocidad de giro del rotor ω , la longitud de pala L y la velocidad del viento v , como se muestra en la ecuación 3.14:

$$\lambda = \frac{\omega \cdot L}{v}$$

La representación de esta ecuación es la siguiente:

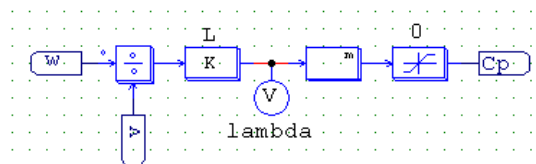


Fig. 3.12: Obtención de C_P

Uniendo ambos modelos se obtiene una representación sencilla de la turbina, aún bastante incompleta, pues falta añadir la parte dinámica (momento de inercia, relaciones entre pares etc.). Esta parte dinámica depende de algunos

parámetros de la multiplicadora, por lo que se verá más adelante en la modelización de dicho componente.

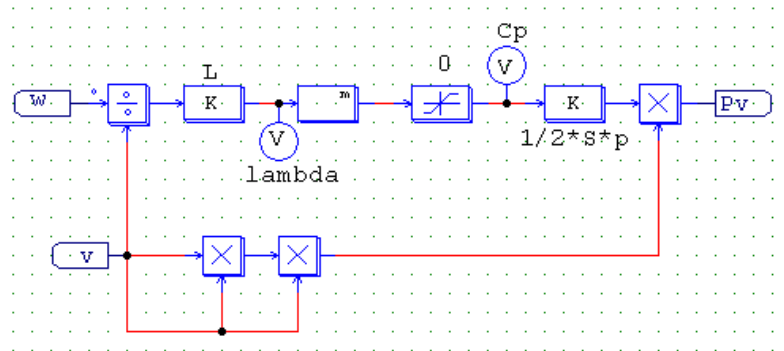


Fig. 3.13: Obtención de P_v a partir de ω y v

Por último, a partir de la potencia del viento P_v y de la velocidad de giro de la turbina ω también se obtiene el par del viento T_v . A este par también se le colocará un limitador para que su valor sea siempre positivo:

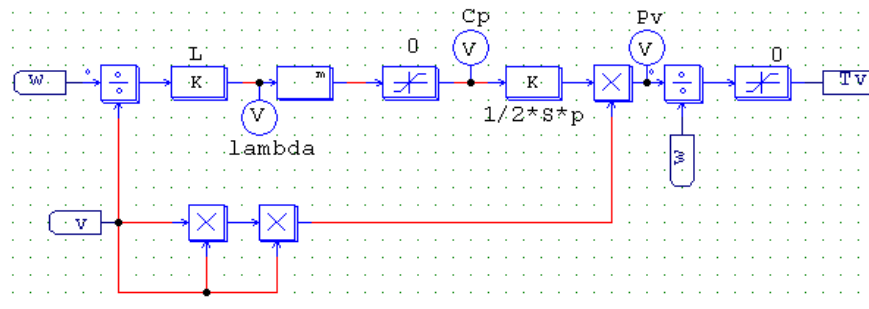


Fig. 3.14: Modelo simplificado de la turbina

3.4- CARACTERIZACIÓN DE LA TURBINA

3.4.1- VELOCIDAD DEL VIENTO v

Para el análisis del comportamiento del modelo completo se realizarán simulaciones con datos de viento real, pero también será interesante en algunos momentos simular con valores constantes de viento. Los valores de viento constante empleados estarán comprendidos entre el valor mínimo de viento con el que el aerogenerador es capaz de producir potencia útil y la velocidad máxima de viento a la cual es capaz de trabajar la turbina.

La mayoría de los pequeños aerogeneradores comienzan a producir potencia útil a partir de una velocidad de 3m/s, mientras que su velocidad máxima de trabajo suele ser de entre 12m/s y 15m/s. En nuestro caso se considerarán las velocidades mínima y máxima de trabajo del aerogenerador de la figura 3.1 (3,4m/s y 12,5m/s respectivamente). Cuando se realicen simulaciones con valores de viento constantes, estos valores serán de 4m/s, 6m/s, 8m/s, 10m/s y 12m/s. Con estos valores se cubrirá todo el rango de funcionamiento del aerogenerador, se tendrá un nivel de detalle considerable de lo que ocurre a velocidades bajas, medias y altas; y puesto que no se trata de un número muy elevado de valores no será necesario realizar demasiadas simulaciones.

3.4.2- DENSIDAD DEL AIRE ρ

La densidad del aire depende de la presión, la temperatura etc., por lo que se producen variaciones en la misma en función de la situación atmosférica. Generalmente se suele considerar como valor estándar 1,25Kg/m³. Se empleará dicho valor en los cálculos a realizar.

3.4.3- COEFICIENTE DE POTENCIA MÁXIMO C_{Pmax}

El tipo de aerogeneradores con mayor rendimiento del mercado son los tripala (su C_{Pmax} está comprendido habitualmente entre 0,3 y 0,45, aunque los más eficientes se aproximan mucho a 0,5). Es fácil comprobar esto si se observan las curvas $C_P - \lambda$ de la figura 3.15 de aerogeneradores tripala (letra E):

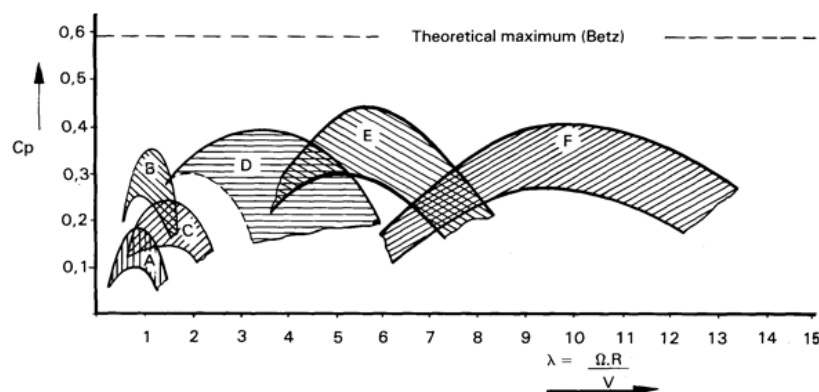


Fig.3.15: curvas $C_P - \lambda$ según el tipo de aerogenerador

Debido a que nuestro aerogenerador se trata de una turbina tripala de construcción sencilla y económica, se escogerá para el cálculo un valor de C_{Pmax} bajo, de 0,35.

3.4.4- LAMBDA ÓPTIMA λ^*

A partir de la figura 3.15 se puede comprobar también que los valores de lambda óptima λ^* para los aerogeneradores tripala se mueven en un rango que va desde alrededor de 5 (en el caso de los de menor C_{Pmax} , parte inferior de las curvas E) hasta alrededor de 6 (en el caso de los de mayor C_{Pmax} , parte superior de dichas curvas).

Puesto que nuestro aerogenerador posee un C_{Pmax} bajo, se supondrá un valor de lambda óptima λ^* igual a 5.

3.4.5- CURVA $C_P-\lambda$

A través de un bloque de función matemática se obtendrá en el modelo de la turbina el valor de C_P correspondiente al valor de λ que se tenga en cada instante de tiempo. En dicho bloque se debe introducir una función que represente la curva $C_P-\lambda$.

A continuación se va a aproximar la curva $C_P-\lambda$ a una parábola, cuya función podrá ser introducida en dicho bloque matemático del modelo de la turbina. Dicha función debe cumplir la ecuación 3.15, mostrada anteriormente:

$$C_P = a \cdot \lambda^2 + b \cdot \lambda + c$$

Se van a plantear algunas condiciones que debe cumplir la parábola y que permitirán hallar los parámetros a , b y c :

1- C_P se anula cuando la velocidad de giro del aerogenerador es 0. A su vez, de la ecuación 3.14 se obtiene que cuando dicha velocidad es 0 también λ vale 0. Por lo tanto, la parábola debe pasar por el punto ($\lambda=0$; $C_P=0$):

$$0 = a \cdot 0^2 + b \cdot 0 + c \quad \rightarrow \quad c = 0$$

2- Conociendo los valores de C_{Pmax} y λ^* se obtiene el punto más elevado de la curva $C_P-\lambda$, correspondiente al punto de trabajo óptimo ($\lambda^*=5$; $C_{Pmax}=0,35$). De aquí se obtiene la siguiente ecuación:

$$0,35 = a \cdot 5^2 + b \cdot 5 + c \quad \rightarrow \quad 0,35 = 25a + 5b$$

3- En una parábola se cumple siempre la siguiente ecuación, según la cual la relación entre los parámetros a y b depende del punto en el que dicha parábola alcanza el valor máximo:

$$y_{\max} = \frac{-b}{2a}$$

Puesto que se conoce el punto máximo, se puede hallar la relación entre a y b :

$$\lambda_{C_p \max} = \frac{-b}{2a} = 5 \quad \rightarrow \quad a = -0,1b$$

4- Por último la parábola es convexa, así que el parámetro a debe ser negativo:

$$a < 0$$

De los apartados 2 y 3 se obtiene un sistema de dos ecuaciones y dos incógnitas (a y b):

$$\begin{aligned} 25a + 5b - 0,35 &= 0 \\ a + 0,1b &= 0 \end{aligned}$$

La solución de dicho sistema es:

$$\begin{aligned} a &= -0,014 \\ b &= 0,14 \end{aligned}$$

Por lo que efectivamente se cumple también el apartado 4, según el cual el parámetro a debe ser negativo. En definitiva, la parábola que representa a la curva $C_p-\lambda$ es la siguiente:

$$C_p = -0,014\lambda^2 + 0,14\lambda$$

Y su representación gráfica es:

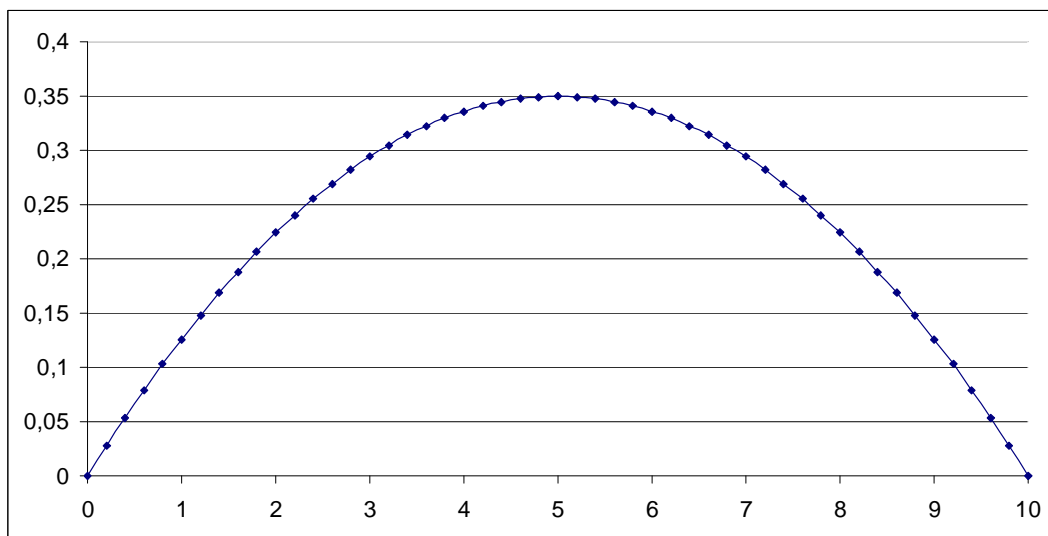


Fig. 3.16: Representación de parábola equivalente a curva $C_p-\lambda$

3.4.6- LONGITUD DE PALA L

El buje del rotor posee un radio muy pequeño en comparación con la longitud de las palas, por lo que se puede considerar que el radio del área de barrido del rotor R será igual a la longitud de pala L .

Puesto que se tiene una turbina de 2m de diámetro de rotor, la longitud de pala L (realizando la mencionada aproximación) será de 1m.

3.4.7- SECCIÓN DE PALA

Se ha seleccionado un perfil NACA 4415. Por tanto, se tienen los siguientes valores:

$$m=0,04$$

$$p=0,4$$

$$t=0,01$$

$$h=0,05$$

Se han redactado las ecuaciones 3.16, 3.17, 3.18, 3.19, 3.20, 3.21 y 3.22 en una tabla Excel. Se han introducido los valores de m , p , t y h en dichas ecuaciones.

Introduciendo además unos valores de x_c que van desde 0 hasta 1, con incrementos de 0,001 se obtienen los puntos de la camber line (x_c, y_c), los de la superficie superior del perfil (x_s, y_s) y los de la superficie inferior (x_i, y_i):

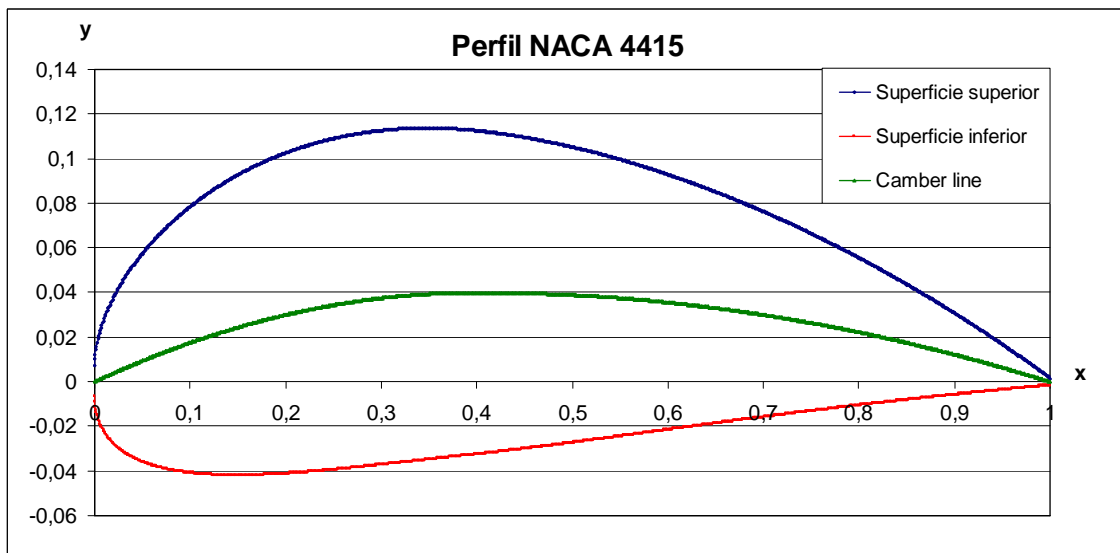


Fig. 3.17: Perfil NACA 4415

La tabla de datos empleada para la obtención la gráfica de la figura 3.17 se muestra en el archivo Excel adjunto “Cálculo de la sección de pala y del momento de inercia de la turbina”.

3.4.8-CUERDA c_n , LONGITUD DE SECCIÓN l_n Y NÚMERO DE SECCIONES N

Aunque la forma que tiene la sección no cambia a lo largo de la pala, la cuerda c se irá reduciendo conforme nos vamos alejando de la base de la pala y acercando a la punta. Los valores de cuerda se obtendrán a partir de otros ejemplos de palas similares, adaptado los datos del ejemplo a nuestra configuración.

Se ha hallado un proyecto realizado por Teodoro Sánchez que emplea un aerogenerador de características muy parecidas al nuestro. Concretamente, en dicho proyecto se empleó un pequeño aerogenerador tripala de longitud de pala 0,85m y perfil NACA 4412. El autor dividió las palas en dos tramos claramente diferenciados:

-Tramo 1: Es la base de la pala, la parte más cercana al buje. Su longitud es 0,15m y su sección no se corresponde con el perfil NACA 4412.

-Tramo 2: El resto de la pala hasta la punta. Su longitud es 0,70m y su sección es igual al perfil NACA 4412, con cuerda decreciente hasta llegar a la punta.

En dicho proyecto se analizó la cuerda del segundo tramo de la pala dividiendo esos 0,70m en 15 secciones separadas entre sí 0,05m. A continuación se muestran los valores de cuerda que obtuvieron para cada una de esas 15 secciones:

Sección de pala Nº	Distancia hasta la base de pala (m)	Cuerda (m)
1	0,15	0,1679
2	0,2	0,1608
3	0,25	0,1537
4	0,3	0,1466
5	0,35	0,1395
6	0,4	0,1324
7	0,45	0,1253
8	0,5	0,1182
9	0,55	0,1111
10	0,6	0,104
11	0,65	0,0969
12	0,7	0,0898
13	0,75	0,0827
14	0,8	0,0756
15	0,85	0,0685

Fig. 3.18: Datos de cuerda del perfil NACA 4412 del proyecto de Teodoro Sánchez

A continuación se realizará una aproximación que permita obtener unos datos adecuados para nuestro aerogenerador a partir de los datos obtenidos en el proyecto de Teodoro Sánchez.

La longitud de pala de nuestro aerogenerador es 1m, en lugar de 0,85m. Por tanto es evidente que en nuestro caso el segundo tramo de la pala no debería tener una longitud igual a 0,70m, sino mayor.

Haciendo una regla del tres podemos hallar el valor necesario para nuestro caso:

$$\begin{array}{ccc} \underline{L} & \underline{\text{Tramo2}} & \\ 0,85m & \rightarrow & 0,70m \\ 1m & \rightarrow & X \end{array} \quad \frac{0,70 \cdot 1}{0,85} = 0,8235m$$

A continuación se quiere hallar la distancia que separa cada sección con respecto a la siguiente. El número total de secciones es 15, pero como el inicio y el final del segundo tramo están ocupados por la primera y la última sección, en realidad se dividirá la longitud del segundo tramo en $N=14$ partes iguales:

$$0,8235/14 = 0,0588m$$

Para que el análisis sea más cómodo se ha decidido redondear la longitud de cada sección l_n a 0,06m. Esto implica aumentar ligeramente la longitud del 2º tramo, de los 0,8235m teóricos hasta 0,84m (lo cual parece perfectamente asumible), ya que:

$$0,06 \cdot 14 = 0,84m$$

En definitiva, las palas de nuestro aerogenerador estarán compuestas de:

-Tramo 1: 0,16m de sección distinta a NACA 4415 (la sección del primer tramo suele ser típicamente elíptica, pero la su forma exacta no nos interesa).

-Tramo 2: 0,84m de sección NACA 4415. Se dividirá el segundo tramo en 15 secciones separadas 0,06m entre sí con cuerda decreciente hasta la punta. La cuerda de cada una de estas 15 secciones se puede hallar también a partir de los datos del aerogenerador de Teodoro Sánchez con otra regla del tres:

$$\begin{array}{ccc} \underline{L} & \underline{\text{Cuerda} - \text{Sección}_n} & \\ 0,85m & \rightarrow & \frac{c_n - \text{Teod}}{c_n} \\ 1m & \rightarrow & c_n \end{array} \quad c_n = \frac{c_n - \text{Teod} \cdot 1}{0,85}$$

A partir de las 15 secciones se de Teodoro Sánchez se ha calculando en una hoja Excel esa regla del tres obteniendo los siguientes valores de cuerda (puesto que se tienen $N=14$ partes iguales, se ha eliminado la última sección):

Sección de pala nº	Distancia hasta la base de pala (m)	Cuerda (m)
1	0,16	0,197529412
2	0,22	0,189176471
3	0,28	0,180823529
4	0,34	0,172470588
5	0,4	0,164117647
6	0,46	0,155764706
7	0,52	0,147411765
8	0,58	0,139058824
9	0,64	0,130705882
10	0,7	0,122352941
11	0,76	0,114
12	0,82	0,105647059
13	0,88	0,097294118
14	0,94	0,088941176

Fig. 3.19: Datos de cuerda de nuestra turbina, de perfil NACA 4415

3.4.9- DENSIDAD DEL MATERIAL DE PALA ρ_P

Las palas de los aerogeneradores comerciales suelen fabricarse a partir de fibra de vidrio (la más habitual es E-Glass Fiber) y resinas Epoxy. La fibra de vidrio posee una densidad de 2500 kg/m³, mientras que la densidad de la resina Epoxy es de aproximadamente 1200 kg/m³.

La densidad media de las palas se puede considerar un valor intermedio entre ambos. Puesto que la relación de volumen fibra de vidrio/Epoxy es habitualmente en aerogeneradores comerciales cercana al 50%, consideraremos el promedio de ambos valores como el valor de densidad media de las palas ρ_P , 1850 kg/m³.

3.4.10- MOMENTO DE INERCIA DE LAS PALAS J_P

Se han introducido en una hoja Excel las expresiones siguientes:

Ecuación 3.30, para el cálculo del momento de inercia J_{Zn} de cada sección n (considerando que fuera maciza) con respecto al eje Z_n .

$$J_{Zn} = \sum_{i=0}^{c_n} \left| m \cdot c_n - \frac{(x_{Ui} + x_{Ui+1}) \cdot c_n}{2} \right|^2 \cdot [(x_{Ui+1} - x_{Ui}) \cdot (y_{Ui+1} - y_{Ui}) \cdot c_n^2] \cdot l_n \cdot \rho_P +$$

$$+ \sum_{i=0}^{c_n} \left| m \cdot c_n - \frac{(x_{Li} + x_{Li+1}) \cdot c_n}{2} \right|^2 \cdot [(x_{Li+1} - x_{Li}) \cdot (y_{Li+1} - y_{Li}) \cdot c_n^2] \cdot l_n \cdot \rho_P$$

Ecuación 3.37, para el cálculo del momento de inercia J_{ZVn} de la zona vacía de cada sección n con respecto al eje Z_n :

$$J_{ZVn} = \sum_{i=0}^{c_{Vn}} \left| m \cdot c_{Vn} - \frac{(x_{Ui} \cdot c_{Vn} + e) \cdot (x_{Ui+1} \cdot c_{Vn} + e)}{2} \right|^2 \cdot [(x_{Ui+1} - x_{Ui}) \cdot (y_{Ui+1} - y_{Ui}) \cdot c_{Vn}^2] \cdot l_n \cdot \rho_P +$$

$$+ \sum_{i=0}^{c_{Vn}} \left| m \cdot c_{Vn} - \frac{(x_{Li} \cdot c_{Vn} + e) \cdot (x_{Li+1} \cdot c_{Vn} + e)}{2} \right|^2 \cdot [(x_{Li+1} - x_{Li}) \cdot (y_{Li+1} - y_{Li}) \cdot c_{Vn}^2] \cdot l_n \cdot \rho_P$$

Ecuación 3.41, para el cálculo del momento de inercia J_{Xn} de cada sección n con respecto al eje de giro X a partir de los datos obtenidos en 3.30 y 3.37:

$$J_{Xn} = J_{Zn} - J_{ZVn} + \left[\sum_{i=0}^{c_n} \Delta A_{Ui} + \Delta A_{Li} - \sum_{i=0}^{c_{Vn}} \Delta m_{UVi} + \Delta m_{LVi} \right] \cdot l_n \cdot \rho_P \cdot [l_{T1} + l_n \cdot (n - 0,5)]^2$$

Ecuación 3.42, para el cálculo del momento de inercia total de la turbina J_P a partir de los datos obtenidos en la ecuación 3.41:

$$J_P = 3 \cdot \sum_{n=1}^{n=N} J_{Xn}$$

Las ecuaciones 3.30, 3.37 y 3.41 (cuyo objetivo es hallar J_{zn} , J_{zv_n} y J_{xn} respectivamente) se han implementado objetivo es hallar

En la figura siguiente se muestran los resultados hallados de J_{zn} , J_{zv_n} y J_{xn} para cada una de las 14 secciones. Junto a ellos, la masa de cada sección m_n , la distancia con respecto al eje de giro x_n y el momento de inercia total J_P :

Sección n	J_{zn}	J_{zv_n}	$J_{zn} - J_{zv_n}$	m_n	x_n	J_{xn}
1	0,000982924	0,00070197	0,000280949	0,086231989	0,19	0,003393924
2	0,000826916	0,00058291	0,000244003	0,082391041	0,25	0,005393443
3	0,00069026	0,0004798	0,000210461	0,078550093	0,31	0,007759125
4	0,000571285	0,00039113	0,000180158	0,074709145	0,37	0,01040784
5	0,000468397	0,00031547	0,00015293	0,070868197	0,43	0,01325646
6	0,000380075	0,00025146	0,00012861	0,067027249	0,49	0,016221853
7	0,000304875	0,00019784	0,000107034	0,0631863	0,55	0,01922089
8	0,000241428	0,00015339	8,80355E-05	0,059345352	0,61	0,022170441
9	0,00018844	0,00011699	7,14497E-05	0,055504404	0,67	0,024987377
10	0,000144694	8,7583E-05	5,71112E-05	0,051663456	0,73	0,027588567
11	0,000109047	6,4192E-05	4,48546E-05	0,047822508	0,79	0,029890882
12	8,04308E-05	4,5916E-05	3,45146E-05	0,04398156	0,85	0,031811192
13	5,78548E-05	3,1929E-05	2,59258E-05	0,040140612	0,91	0,033266367
14	4,04021E-05	2,1479E-05	1,89229E-05	0,036299664	0,97	0,034173277
Momento de inercia total de una pala						0,279541636
Momento de inercia total de la turbina (J_P)						0,838624909

Fig. 3.20: Momentos de inercia J_{zn} , J_{zv_n} y J_{xn} junto al momento de inercia total de la turbina J_P

El valor de la inercia total de la turbina es $J_P = 0,83862 \text{ Kg}\cdot\text{m}^2$. Los cálculos completos realizados a partir de las fórmulas arriba explicadas se muestran en el archivo Excel adjunto "Cálculo de la sección de pala y del momento de inercia de la turbina".

4- COMPONENTES DEL SISTEMA: MULTIPLICADORA

4.1- DESCRIPCIÓN DE LA MULTIPLICADORA

4.1.1- CÁLCULO DE LA MULTIPLICADORA DESEADA

La multiplicadora es el componente constructivamente más sencillo del sistema, pero posee un parámetro determinante en los resultados: la relación de transformación, que influye sobremanera en el rango de velocidades de trabajo obtenido en el generador. La elección de una multiplicadora adecuada permite que las velocidades de funcionamiento en el generador sean las deseadas para el rango de velocidades de viento habitual en la zona en la que se ubica el aerogenerador. Es por ello que se ha dejado el diseño de la multiplicadora para el final, de manera que se pueda escoger la polea que mejor se adapte a las condiciones de trabajo de nuestro sistema.

Sin embargo, en los ensayos realizados en este proyecto se ha empleado inicialmente una polea multiplicadora existente de un proyecto que fue llevado a cabo anteriormente por otro alumno. Esta multiplicadora empleada en los ensayos no será necesariamente la más adecuada para nuestro proyecto (como de hecho se comprobará más adelante), ya que su relación de transformación no se corresponderá necesariamente con aquella que nos proporcione el rango de velocidades del generador deseado para las velocidades de viento existentes.

En definitiva, aunque se haya utilizado dicha multiplicadora en algunos ensayos y también como ejemplo para explicar las ecuaciones que rigen su funcionamiento, al final de este apartado se diseñará otra polea distinta que será la que se empleará en el modelo. A continuación se describe la multiplicadora empleada y sus componentes. Está compuesta de tres partes: polea, correa y bancada.

4.1.2- POLEA

Es una polea trapezoidal de radio 0,12m que se acopla al eje de la turbina.



Fig. 4.1: Polea de la multiplicadora

En los ensayos realizados, la función de la turbina es cubierta por una máquina de corriente continua del laboratorio, por lo que en realidad la polea se ha fijado al eje de la misma.

4.1.3- CORREA

Es una correa dentada de caucho que se coloca alrededor de la polea y del eje del alternador para transmitir la potencia mecánica del eje de la turbina al eje del generador. Debido a que la polea acoplada a la turbina posee un diámetro mucho mayor que el del generador, la velocidad de giro del generador es mayor que la de la turbina (se multiplica), mientras que el par se ve reducido.

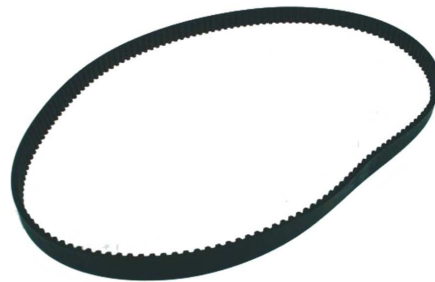


Fig. 4.2: Correa de la multiplicadora

4.1.4- BANCADA

Es el soporte sobre el cual se fija el alternador. Se coloca al lado de la polea, dejando el eje del generador y el de la turbina alineados con el propósito de que la correa los una. El alternador se puede colocar en distintas posiciones que permiten tensar la correa.



Fig. 4.3: Bancada de la multiplicadora

Al igual que la polea y la correa dentada, la bancada fue utilizada en un proyecto anterior por otro alumno de esta universidad. Sin embargo, el alternador usado por este alumno no es el mismo que el empleado en el presente proyecto, debido a lo cual las geometrías existentes en la bancada para ajustar la posición del alternador no eran válidas en nuestro caso.

Por ello, se ha diseñado una pieza adicional con una ranura en forma de cuarto de círculo. El radio de dicho círculo mide 0,173m, que es exactamente la distancia que separa los dos centros de los moyús que sirven para fijar del alternador (ver figura 4.4):

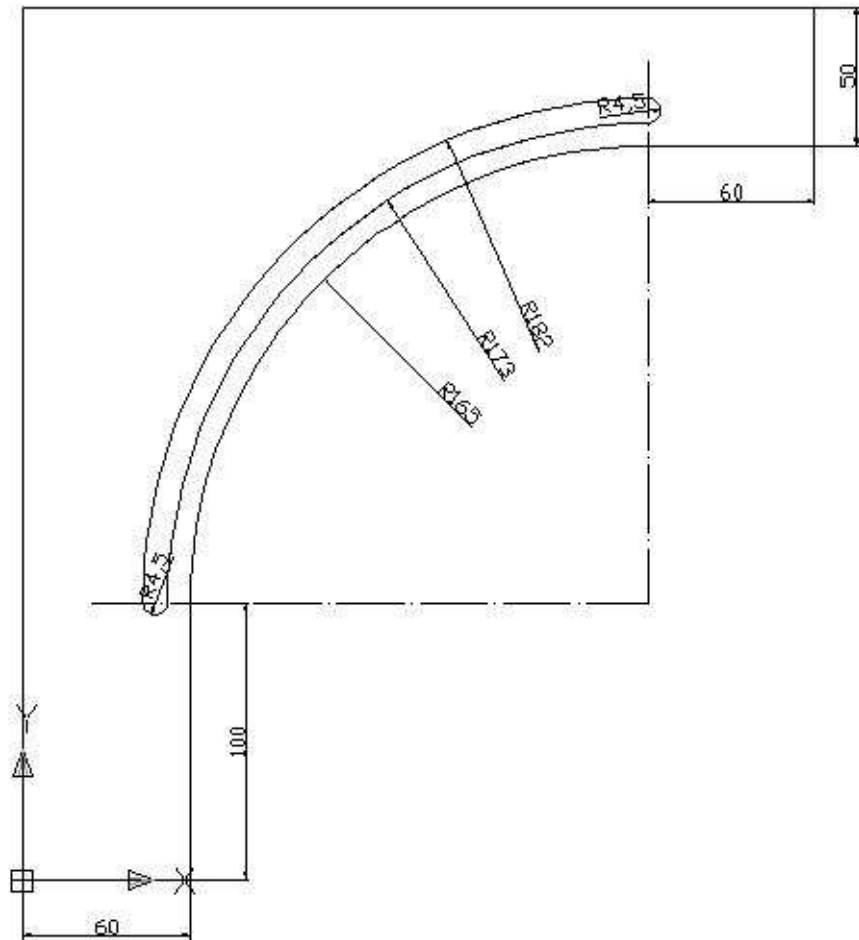


Fig. 4.4: Pieza de acero adicional soldada a la bancada, con geometrías para el tensado

Posteriormente esta pieza ha sido soldada a la parte frontal de la bancada (ver figura 4.5). Se ha hecho coincidir el centro de dicho cuarto de círculo con uno de los puntos de fijación existentes en la bancada.

De esta manera, uno de los extremos del alternador podrá ser atornillado a dicho punto de fijación de la bancada, mientras que el otro extremo del alternador puede ser atornillado en la ranura de la nueva pieza soldada. Una vez atornillado por ambos extremos, el alternador quedará perfectamente fijado.

Pero al mismo tiempo, la disposición escogida permite desplazar el tornillo a lo largo de la ranura simplemente aflojando la tuerca situada sobre la nueva pieza y volviendo a apretar una vez colocado en la nueva posición. Con ello se permite alejar o acercar el alternador con respecto a la polea según se desee, tensando o destensando la correa respectivamente.



Fig. 4.5: Imagen frontal de la bancada, con la pieza de acero adicional soldada al frente

También se han colocado unos tornillos en las dos patas del lateral izquierdo de la bancada. Esto permite atornillar la bancada a la base del soporte de la máquina eléctrica del laboratorio, quedando ambas unidas. De esta forma se pretende evitar que la bancada pueda desplazarse o vibrar en exceso como consecuencia del movimiento de giro del alternador, la polea y la correa de transmisión.

Los cuatro puntos de apoyo de la bancada sobre el suelo están cubiertos por cuatro patas de caucho, cuyo alto coeficiente de rozamiento limita un poco más los posibles desplazamientos de la bancada durante el funcionamiento del alternador.

4.2- FUNCIONAMIENTO Y ECUACIONES DE LA MULTIPLICADORA

4.2.1- TIPOS DE SISTEMAS DE TRANSMISIÓN

Los tipos de transmisión más utilizados son los engranajes y las correas. Las ventajas que poseen las correas frente a los engranajes son principalmente su menor coste y menor nivel de ruido. Por otro lado, la principal desventaja es su par de transmisión menor.

Entre las correas se distinguen tres tipos: las correas planas, las trapezoidales y las dentadas. Las poleas sobre las que se monta cada correa son habitualmente del mismo tipo que la propia correa (es decir, con correas planas se utilizan poleas planas, con correas dentadas poleas dentadas, etc.).

Las correas dentadas montadas sobre poleas dentadas poseen una importante ventaja frente a las trapezoidales y planas: los dientes impiden que la correa pueda deslizarse, por lo que la transmisión es siempre síncrona.

La correa empleada en este proyecto es una correa dentada. Sin embargo, las poleas son trapezoidales, por lo que a efectos prácticos se deben considerar las ecuaciones presentes en correas trapezoidales.

Por ello, a continuación se usarán correas trapezoidales como modelo equivalente para obtener las ecuaciones de la multiplicadora.

4.2.2- PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE LA MULTIPLICADORA

Se supone una multiplicadora de correa trapezoidal como la de la figura 4.6:

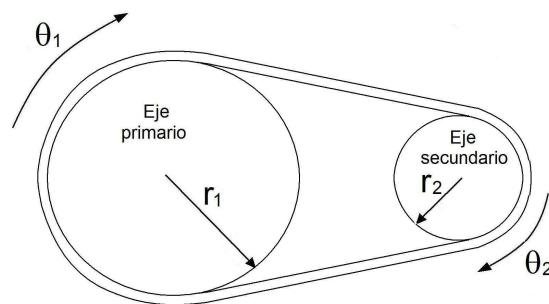


Fig 4.6: Correa de transmisión

La turbina actúa sobre el eje primario, y el eje secundario rueda sobre el eje del generador.

θ_1 y θ_2 representan el movimiento de los ejes primario y secundario.
 r_1 y r_2 representan los radios de los ejes primario y secundario.

En una multiplicadora, siempre se tiene que:

$$r_1 > r_2 \quad (4.1)$$

4.2.3- RELACIÓN DE TRANSMISIÓN RT

El factor de multiplicación o relación de transmisión RT se define como la relación entre los perímetros de los ejes:

$$RT = \frac{2 \cdot \pi \cdot r_1}{2 \cdot \pi \cdot r_2} = \frac{r_1}{r_2} \quad (4.2)$$

Es decir, la relación de transmisión se puede representar también como la relación entre los radios equivalentes de los ejes. Se entiende por radio equivalente la distancia desde el centro de un eje hasta los puntos de apoyo de la correa.

Según esa definición de relación de transformación, cuando $RT > 1$ se tiene que el sistema de transmisión es una multiplicadora, y cuando $RT < 1$ es un reductor.

4.2.4- RELACIONES CINEMÁTICAS

Se van a obtener las variables de posición y sus derivadas respecto al tiempo en función de las variables constructivas de la multiplicadora.

Los espacios lineales recorridos por las circunferencias de los ejes primario y secundario deben ser necesariamente iguales, por lo que se tiene que:

$$r_1 \cdot \Theta_1 = r_2 \cdot \Theta_2 \quad (4.3)$$

Introduciendo el factor de multiplicación RT se obtiene la siguiente relación:

$$\Theta_2 = RT \cdot \Theta_1 \quad (4.4)$$

Asimismo, derivando con respecto al tiempo se obtiene que la velocidad depende igualmente del factor RT , puesto que este es constante:

$$\omega_2 = RT \cdot \omega_1 \quad (4.5)$$

Lo mismo ocurre con la segunda derivada, la aceleración:

$$\alpha_2 = RT \cdot \alpha_1 \quad (4.6)$$

4.2.5- TRANSMISIÓN DE POTENCIA

Cuando se tiene en funcionamiento un sistema de transmisión mediante una correa y unas poleas (siempre que sean poleas planas o trapezoidales), uno de los dos ramales de la correa estará siempre sometido a mayor tensión que el otro ramal, como se indica en la figura inferior:

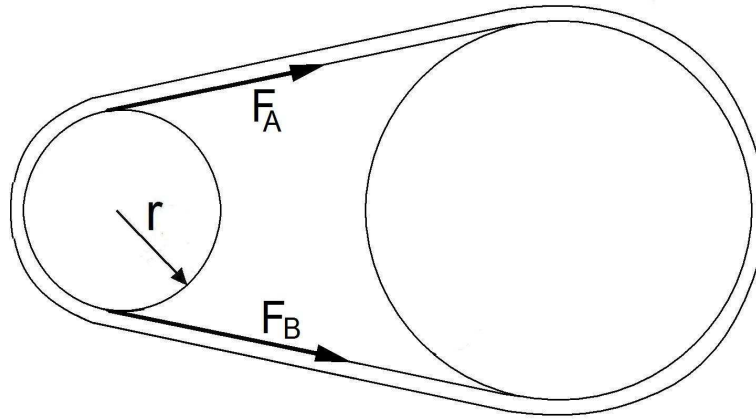


Fig 4.7: Correa de transmisión

El par motor T transmitido por la correa desde el punto en el que entra en la polea hasta el punto en el que abandona la misma es igual al producto entre los siguientes dos componentes: el radio de la polea r y la diferencia entre la tensión del ramal más cargado F_B y la tensión del ramal menos cargado F_A de la correa:

$$T = (F_B - F_A) \cdot r \quad (4.7)$$

Del producto entre la velocidad de giro ω y el radio r se obtiene la velocidad lineal v :

$$v = \omega \cdot r \quad (4.9)$$

A su vez, la potencia P se puede expresar como el producto entre el par T y la velocidad de giro ω :

$$P = T \cdot \omega \quad (4.8)$$

Introduciendo las ecuaciones 4.7 y 4.8 en la ecuación 4.9 se obtiene la expresión de la potencia:

$$P = (F_B - F_A) \cdot v \quad (4.10)$$

4.2.6- RENDIMIENTO

En un sistema de transmisión de correa trapezoidal la potencia en el secundario es ligeramente inferior a la del primario. Esto se debe a que la velocidad en el eje secundario no es en realidad exactamente igual a la velocidad en el eje primario multiplicada por la relación de transmisión RT , sino un valor ligeramente inferior al que se obtendría de hacer ese producto (alrededor de un 2%-3% menor):

$$\omega_1 = \eta \cdot RT \cdot \omega_2 \quad (4.11)$$

La causa de esta reducción de velocidad es el deslizamiento. Sin embargo, esto mismo no ocurre con el par transmitido, que no se ve reducido por el efecto del deslizamiento.

Consecuentemente, la multiplicadora tiene en realidad un rendimiento de aproximadamente un 97%-98%. Sin embargo, debido a que este es un valor muy cercano a la unidad se despreciará el rendimiento y no se empleará en las ecuaciones.

4.2.7- RELACIONES DE PAR

La relación entre el par del primario T_1 y del secundario T_2 se puede obtener a partir del balance de potencias. Se ha considerado que el rendimiento será la unidad, por lo que se tiene que la potencia a la salida es la misma que a la entrada:

$$P_2 = P_1 \quad (4.12)$$

Introduciendo en la ecuación 4.12 la representación de la potencia P en función de par y velocidad de la ecuación 4.8 se obtiene:

$$T_2 \cdot \omega_2 = T_1 \cdot \omega_1 \quad (4.13)$$

Sustituyendo las velocidades de las ecuación 4.13 por la relación de transmisión según se indica en la ecuación 4.5:

$$T_2 = \frac{T_1}{RT} \quad (4.14)$$

La expresión de los pares mediante la relación de transmisión RT permitirá hallar las ecuaciones para transformar los momentos de inercia de cada uno de los elementos del sistema, haciendo posible transferirlos del primario al secundario y viceversa.

4.2.8- RELACIONES DEL MOMENTO DE INERCIA

El momento de inercia de cada uno de los ejes primario y secundario es igual al par de ese mismo eje dividido entre la aceleración:

$$J_1 = \frac{T_1}{\alpha_1} \quad (4.15)$$

$$J_2 = \frac{T_2}{\alpha_2} \quad (4.16)$$

A partir de las ecuaciones 4.6 y 4.14 es posible hallar la relación entre J_1 y J_2 :

$$J_1 = \frac{T_1}{\alpha_1} = \frac{T_1 \cdot RT}{\frac{\alpha_2}{RT}} = \frac{T_2 \cdot RT^2}{\alpha_2} = J_2 \cdot RT^2 \quad (4.17)$$

4.2.9- MOMENTO TOTAL DE INERCIA

El primario de nuestro sistema está compuesto por la turbina y la polea de la multiplicadora, luego el momento de inercia del primario J_1 es la suma de los momentos de inercia de las palas de la turbina J_P y de la polea J_M :

$$J_1 = J_P + J_M \quad (4.18)$$

Mientras que el momento de inercia del eje secundario es el del generador J_G :

$$J_2 = J_G \quad (4.19)$$

El momento de inercia total se puede representar con respecto al primario y con respecto al secundario. Visto desde el primario sería así:

$$J_{T1} = J_P + J_M + J_G \cdot RT^2 \quad (4.20)$$

Visto desde el secundario posee la siguiente expresión:

$$J_{T2} = \frac{J_P}{RT^2} + \frac{J_M}{RT^2} + J_G \quad (4.21)$$

Ambas expresiones se pueden utilizar en la realización del modelo. Puesto que el momento de inercia total se empleará justo después de haber hecho la resta entre el par del viento (transferido al secundario mediante la relación de transformación RT) y el par electromagnético del generador, se tomará la expresión del momento de inercia total visto desde el secundario para reducir el número de transformaciones necesarias.

4.2.11-MOMENTO DE INERCIA DE LA MULTIPLICADORA J_M

La geometría de la multiplicadora puede aproximarse a la de un cilindro de radio R y masa m que gira con respecto a su eje longitudinal Z , como el cilindro de la figura inferior:

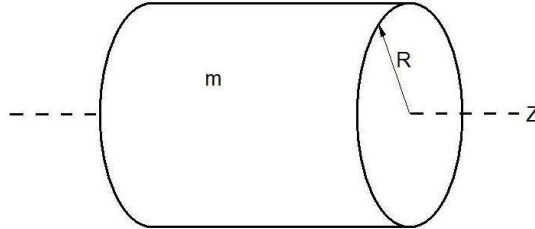


Fig. 4.8: Cilindro de masa m y radio R que gira con respecto a su eje longitudinal Z

El momento de inercia de un cilindro como el de la figura con respecto a su eje longitudinal Z es:

$$J_Z = \frac{1}{2} \cdot m \cdot r^2 \quad (4.22)$$

De tal forma que el momento de inercia de la multiplicadora J_M con respecto al eje de giro será el siguiente:

$$J_M = \frac{1}{2} \cdot m_M \cdot r_M^2 \quad (4.23)$$

Donde m_M es la masa de la polea y r_M es su radio.

4.2.12- MOMENTO DE INERCIA DEL GENERADOR J_G

Al igual que en el caso de la multiplicadora, también la geometría del alternador puede ser aproximada a la de un cilindro de radio R y masa m que gira con respecto a su eje longitudinal Z .

Por ello la expresión del momento de inercia del generador J_G con respecto a su eje de giro será análoga a la de la multiplicadora:

$$J_G = \frac{1}{2} \cdot m_G \cdot r_G^2 \quad (4.24)$$

Donde m_G es la masa del alternador y r_G es su radio.

4.2.13- RELACIÓN ENTRE PAR DEL VIENTO Y PAR ELECTROMAGNÉTICO

La figura inferior muestra los pares, las velocidades y los momentos de inercia presentes en el sistema:

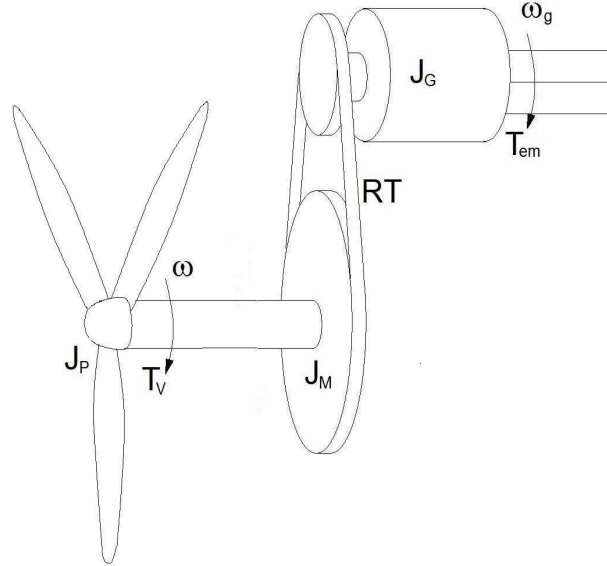


Fig. 4.9: Inercias, pares y velocidades en turbina, multiplicadora y generador

La diferencia entre el par del viento T_v y el par electromagnético del generador T_{em} será igual al producto entre la inercia total y la aceleración.

Ahora bien, habrá que tener en cuenta si se considera la inercia total vista desde el primario o desde el secundario, pues habrá que referenciar todas las variables con respecto al eje empleado para la inercia.

Referenciando todo con respecto al eje primario se obtiene:

$$T_v - T_{em} \cdot RT = J_{T1} \cdot \frac{d\omega}{dt} = (J_P + J_M + J_G \cdot RT^2) \cdot \frac{d\omega}{dt} \quad (4.25)$$

Mientras que referenciando todo con respecto al eje secundario:

$$\frac{T_v}{RT} - T_{em} = J_{T2} \cdot \frac{d\omega_g}{dt} = \left(\frac{J_P}{RT^2} + \frac{J_M}{RT^2} + J_G \right) \cdot \frac{d\omega_g}{dt} \quad (4.26)$$

Donde ω es la velocidad de giro de la turbina y ω_g la velocidad de giro del generador.

Como ya se ha dicho antes, se ha decidido utilizar la expresión del momento de inercia total visto desde el secundario J_{T2} , por lo que la ecuación utilizada en el modelo para obtener la relación de pares será también la correspondiente al secundario (ecuación 4.29).

4.3- MODELO DE LA MULTIPLICADORA

El modelo de la multiplicadora está estrechamente unido al modelo del generador y al de la turbina. Del modelo de la turbina se obtiene el par del viento T_v , mientras que del modelo del generador se obtendrá el par electromagnético T_{em} .

Introduciendo ambos valores en la ecuación 4.26 se puede obtener la velocidad de giro del aerogenerador ω_g , la cual será introducida de nuevo en el modelo de la turbina.

$$\frac{T_v}{RT} - T_{em} = J_{T2} \cdot \frac{d\omega_g}{dt} = \left(\frac{J_P}{RT^2} + \frac{J_M}{RT^2} + J_G \right) \cdot \frac{d\omega_g}{dt}$$

Para realizar la resta entre los dos pares como se muestra en la ecuación 4.26, primero hay que hallar el valor del par del viento transferido al secundario, para lo cual se divide el mismo entre la relación de transmisión RT , según la ecuación 4.14:

$$T_2 = \frac{T_1}{RT} \rightarrow T_{v2} = \frac{T_v}{RT}$$

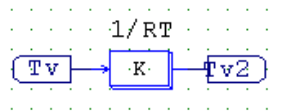


Fig. 4.10: Par del viento transferido al secundario

Restándole al valor obtenido de par del viento en el secundario T_{v2} el par electromagnético T_{em} se obtiene el producto entre el momento total de inercia visto desde el secundario J_{T2} y la aceleración del secundario α_g , tal y como se ha mostrado en la ecuación 4.26:

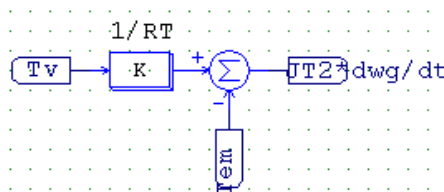
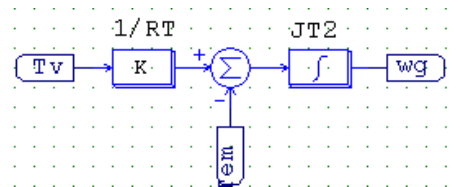


Fig. 4.11: Obtención del producto entre J_{T2} y α_g

Dividiendo dicho producto por la inercia total en el secundario (calculada a partir de la ecuación 4.21) e integrando se obtiene la velocidad de giro del generador.

$$J_{T2} = \frac{J_P}{RT^2} + \frac{J_M}{RT^2} + J_G$$

Se puede aprovechar la variable “constante de tiempo” del integrador para introducir el valor del momento de inercia J_{T2} :

Fig. 4.12: Obtención del ω_g

Por último, multiplicando la velocidad de giro del generador ω_g por la relación de transmisión RT (ecuación 4.5) se obtiene la velocidad de giro de la turbina ω , que se introducirá en el modelo de la turbina:

$$\omega_1 = \frac{\omega_2}{RT} \rightarrow \omega = \frac{\omega_g}{RT}$$

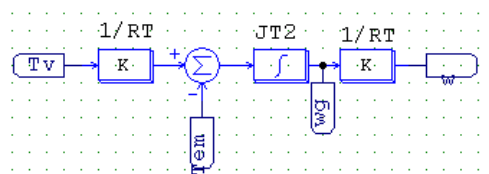


Fig. 4.13: Modelo completo de la multiplicadora

4.4- CARACTERIZACIÓN DE LA MULTIPLICADORA

4.4.1- RELACIÓN DE TRANSMISIÓN DE LA MULTIPLICADORA (RT y RT')

RT se puede definir como la relación entre los radios de los ejes del primario y del secundario, tal y como se muestra en la ecuación 4.2:

$$r_1 = RT \cdot r_2$$

Aunque también puede definirse mediante la relación entre las velocidades del primario y del secundario (ecuación 4.2):

$$\omega_2 = RT \cdot \omega_1$$

Es decir, que de la relación de transmisión dependerán las velocidades de trabajo obtenidas en el sistema. Debido a esto, del valor que se le otorgue a RT dependerá el comportamiento de todo el sistema. Por ello, la relación de transmisión no se va a definir en este apartado, sino que se obtendrá en la parte final del proyecto: se estudiará el comportamiento del sistema para diferentes valores de RT y de otras variables, y se escogerá aquella alternativa que mejor comportamiento del sistema ofrezca, lo cual definirá el valor de relación de transmisión a emplear.

Sin embargo, en este apartado de caracterización de la turbina se requiere conocer las dimensiones de la polea de la multiplicadora (por ejemplo, para calcular el momento de inercia). Y como se ha visto en la ecuación 4.2, del radio de la polea de la multiplicadora dependerá la relación de transmisión RT . Es decir, para proseguir con la caracterización del sistema es necesario otorgar un valor a la relación de transmisión (al que llamaremos RT') que puede no corresponderse con el valor final de RT obtenido en los últimos apartados del proyecto. Si el valor de RT obtenido al final del proyecto difiriera demasiado con respecto de RT' , los cálculos realizados en este apartado se tendrían que revisar (pero como se verá más adelante, esto no será necesario).

Se ha decidido emplear las dimensiones de la polea empleada en los ensayos para caracterizar la multiplicadora. De la ecuación 4.2, para hallar el valor de RT' es necesario conocer también el radio del eje secundario, es decir, la polea del alternador.

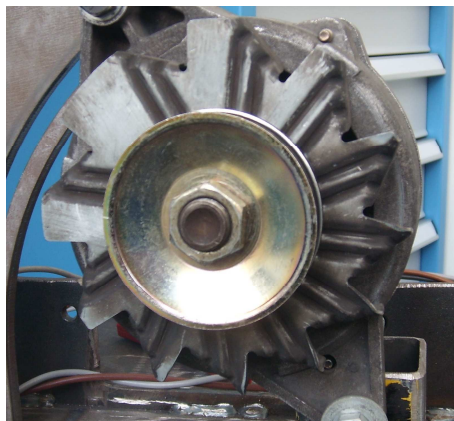


Fig. 4.14: Polea del secundario, en el alternador

Debe tenerse en cuenta que el radio total de la polea es la distancia desde el centro hasta el borde exterior de la polea, pero no es éste el radio que se busca. Se necesita hallar el radio equivalente, entendiendo como tal la distancia desde el centro hasta los puntos de apoyo de la correa. Puesto que la polea posee una hendidura sobre la cual apoya la correa, el radio equivalente es en realidad algo menor que el radio total (ver figura 4.15).

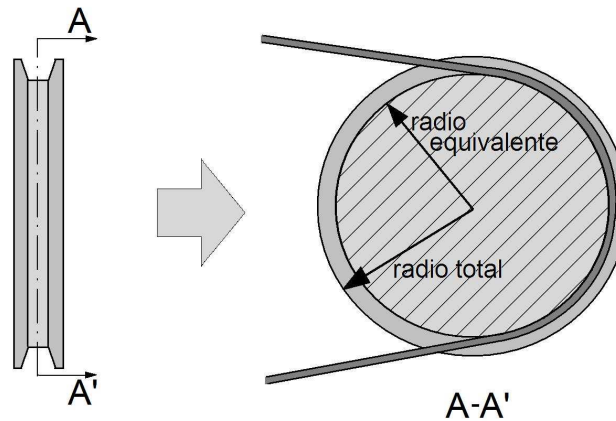


Fig. 4.15: Radio equivalente y radio total de una polea

Para hallar el radio equivalente habrá que medir la altura de las guías situadas a ambos lados de dicha hendidura, y después restar esa altura al valor del radio total. El radio total de la pequeña polea situada en el eje del generador es 0,036m. La altura de las guías situadas a ambos lados del canal sobre el que apoya la correa es aproximadamente 0,008m, por lo que el radio equivalente de la polea del secundario es 0,028m.

La polea empleada posee un radio total de 0,23m y unas alturas de guía de 0,01m, por lo que el radio equivalente es en este caso 0,22m.

De la ecuación 4.2, la relación de transmisión RT' de la polea empleada en los ensayos es:

$$RT' = \frac{r_1}{r_2} \cdot \frac{0,22}{0,028} \approx 8$$

4.4.2- MOMENTO DE INERCIA DE LA MULTIPLICADORA J_M

De la ecuación 4.23, el momento de inercia de la multiplicadora J_M se calcula mediante su radio r_M y su masa m_M :

$$J_M = \frac{1}{2} \cdot m_M \cdot r_M^2$$

La polea de la multiplicadora (la polea del eje primario) se puede considerar un cilindro cuyo radio $r_{MRT'}$ es 0,22m. Su masa $m_{MRT'}$ es 1,8kg. Por lo tanto, el momento de inercia es:

$$J_{MRT'} = \frac{1}{2} \cdot m_{MRT'} \cdot r_{MRT'}^2 = \frac{1}{2} \cdot 1,8 \cdot 0,22^2 = 0,0436 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

Nótese que este valor de inercia de la multiplicadora sólo es válido para la polea que se ha empleado en los ensayos, porque la multiplicadora definitiva no se ha definido aún. Pero al final del proyecto se verá que la relación de transmisión RT finalmente escogida no será muy diferente de la RT' aquí planteada, por lo que las dimensiones de la polea y su momento de inercia tampoco variarán demasiado. Por ello, el resultado aquí obtenido de $J_{MRT'}$ no se corresponderá totalmente con el momento de inercia que hubiera tenido la polea real J_M , pero se le parecerá bastante.

Además de esto, la inercia de la multiplicadora J_M será en cualquier caso mucho menor que la de las palas de la turbina J_P (que vale $0,8386 \text{ kgm}^2$, calculada anteriormente en el apartado de la caracterización de la turbina). Debido a ello, el efecto que pueda tener el error de J_M en la inercia total vista desde el secundario J_{T2} es totalmente despreciable.

4.4.3- MOMENTO DE INERCIA DEL GENERADOR J_G

El alternador se puede considerar un cilindro, cuyo radio r_G es de $0,06\text{m}$. La masa del alternador m_G es $4,6\text{kg}$.

A partir de la ecuación 4.24 el momento de inercia del alternador será:

$$J_G = \frac{1}{2} \cdot m_G \cdot r_G^2 = \frac{1}{2} \cdot 5,4 \cdot 0,09^2 = 0,0219 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

4.4.4- MOMENTO TOTAL DE INERCIA VISTO DESDE EL SECUNDARIO J_{T2}

En el apartado de la turbina se ha obtenido el momento de inercia de la turbina J_P , cuyo valor es $0,8386 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$. El momento de inercia de la multiplicadora J_M es $0,0265 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, y el del generador J_G es $0,0083 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$.

Introduciendo los valores obtenidos en la ecuación 4.21 se obtendrá el momento total de inercia visto desde el secundario $J_{T2RT'}$:

$$J_{T2RT'} = \frac{J_P}{RT'^2} + \frac{J_{MRT'}}{RT'^2} + J_G = \frac{0,8386}{8^2} + \frac{0,0436}{8^2} + 0,0219 = 0,0346 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

Este valor se revisará al final del proyecto, cuando se haya determinado definitivamente la relación de transmisión RT a emplear.

5- COMPONENTES DEL SISTEMA: GENERADOR

5.1- DESCRIPCIÓN DEL GENERADOR

El generador del sistema es un alternador convencional de coche. Es por tanto una máquina síncrona de rotor bobinado como la mostrada en la figura 5.1:

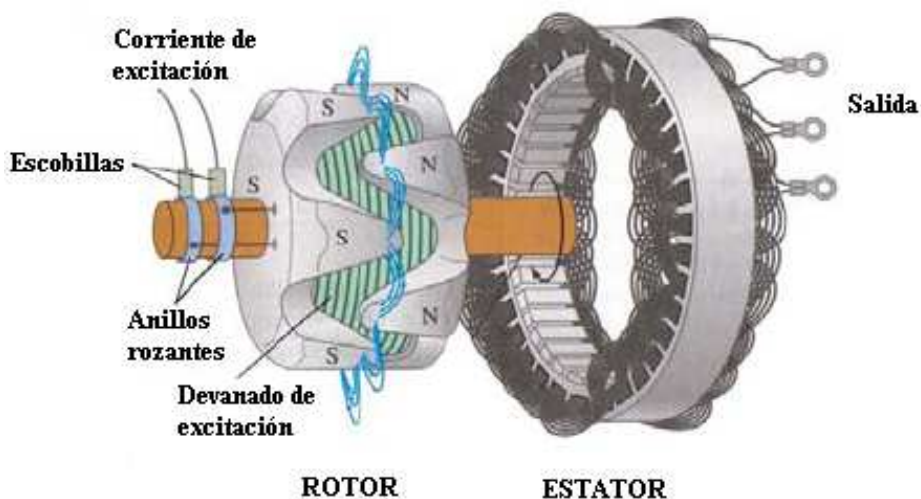


Fig. 5.1: Rotor y estator de un alternador de coche

En los modelos comerciales la salida del devanado del estator está conectada a un rectificador trifásico, también incluido en el conjunto. Nuestro alternador se diferencia de una máquina síncrona clásica en la estructura del circuito magnético del inductor (rotor) y del devanado de excitación.

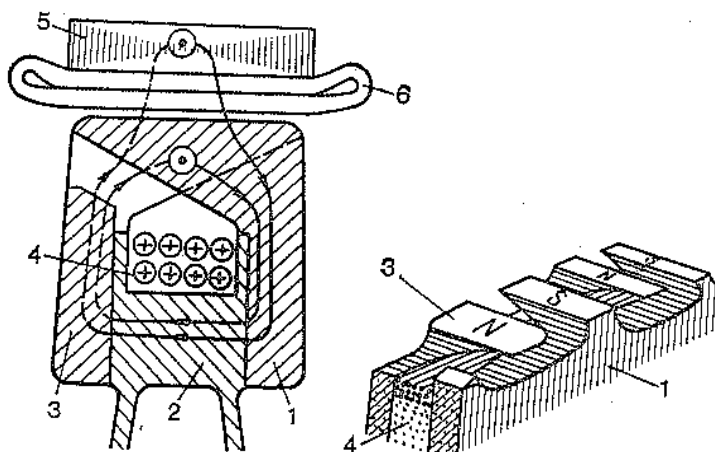


Fig. 5.2: Esquema de los devanados y polos del rotor

El circuito magnético del inductor está integrado por tres piezas: la culata (marcada como 2 en la figura 5.2), el disco con resaltes de garras que forman los polos norte N (1), y el disco con resaltes en forma de garras que constituyen los polos sur S (3).

El devanado de excitación anular (4) está situado entre los discos 1 y 3 con sistemas salientes de polos y es alimentado por medio de los anillos rozantes o de contacto.

Al excitar el inductor, se origina el campo magnético, cuyas líneas, que abarcan los conductores del devanado excitación, se muestran en la figura 5.2. La mayor parte de las líneas que salen de los polos norte, cruza el espacio, se concatena con el devanado del inducido, pasa por la culata y vuelve al inductor por el espacio entre los dientes del inducido y los polos sur. Estas líneas engendran el flujo de inducción mutua con el devanado del inducido.

La menor parte de las líneas se dirige directamente de los polos norte a los polos sur sin originar flujo concatenado útil con el devanado del inducido. Estas líneas dan origen al flujo de dispersión del devanado de excitación.

En la figura 5.3 se muestra el estator de la máquina, que posee 36 ranuras:



Fig. 5.3: Estator del alternador

En la figura 5.4 se aprecia el rotor de la máquina, que posee 6 pares de polos:



Fig. 5.4: Rotor del alternador

La figura 5.5 muestra el porta-escobillas. La transmisión de la corriente del rotor desde los bornes exteriores hasta el devanado alojado en el rotor (en movimiento) se realiza mediante las escobillas, que están siempre en contacto con los anillos rozantes del rotor.



Fig. 5.5: Porta-escobillas del alternador

Como se aprecia en la figura 5.6, las escobillas poseen unos muelles cuya función es presionarlas para que permanezcan siempre en contacto con el eje del rotor, asegurando la transmisión de la corriente de forma permanente entre escobillas y anillos rozantes.



Fig. 5.6: Detalle de las escobillas

El alternador es un DRA0830 de Opel. La figura 5.7 muestra los datos ofrecidos por el fabricante:

DELCO REMY DRA0830

FERMER ☒




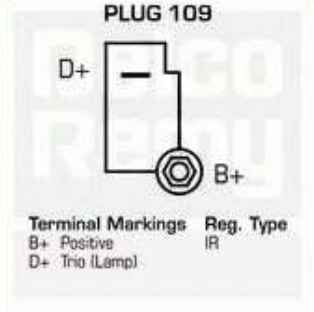
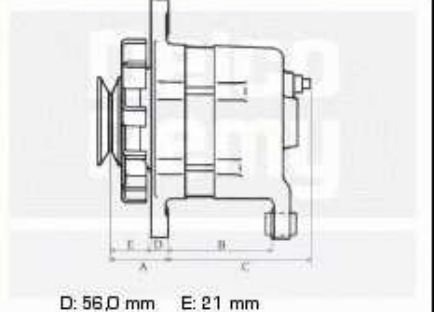
		<div><div>i</div><table><tr><td>Voltage:</td><td>12 V</td></tr><tr><td>Amperage:</td><td>55 A</td></tr><tr><td>Regulator:</td><td>IR</td></tr><tr><td>Rev. Counter:</td><td></td></tr><tr><td>Ribs:</td><td>V</td></tr><tr><td>Technical Bulletin:</td><td>TB-16-19</td></tr></table></div>	Voltage:	12 V	Amperage:	55 A	Regulator:	IR	Rev. Counter:		Ribs:	V	Technical Bulletin:	TB-16-19
Voltage:	12 V													
Amperage:	55 A													
Regulator:	IR													
Rev. Counter:														
Ribs:	V													
Technical Bulletin:	TB-16-19													
	<div><div>PLUG 109</div><div>Terminal Markings Reg. Type B+ Positive IR D+ Trio (Lamp)</div></div>	 <div>D: 56,0 mm E: 21 mm</div>												

Fig. 5.7: Información del fabricante

5.2- FUNCIONAMIENTO Y ECUACIONES DEL GENERADOR

5.2.1- CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA MÁQUINA SÍNCRONA

La máquina síncrona es una máquina eléctrica rotativa que funciona con corriente alterna, y que recibe su nombre de la necesidad de funcionar a la velocidad de sincronismo (los campos magnéticos del rotor y del estator giran a la misma velocidad).

En la máquina síncrona, el rotor es el inductor y el estator el inducido. El rotor habitualmente posee un devanado monofásico, y el estator 3 devanados desfasados entre sí 120° espaciales a lo largo de la longitud del rotor. La técnica de devanado empleada es la de doble capa, explicada anteriormente (devanados distribuidos y de paso acortado).

5.2.2- USO COMO GENERADOR

La máquina síncrona domina ampliamente la generación eléctrica, pues aunque todas las máquinas eléctricas son reversibles, sus condiciones de funcionamiento la hacen muy conveniente para la generación eléctrica en comparación con el resto de máquinas (frente a las desventajas que presenta su uso como motor).

La máquina síncrona es la que se emplea habitualmente también como alternador de coche, como el usado en este proyecto. Curiosamente, la batería del coche se debe cargar con corriente continua, lo que debería jugar en favor de la máquina de corriente continua como mejor opción para su uso como generador en vehículos.

Sin embargo, las máquinas de corriente alterna ofrecen grandes beneficios frente a la de corriente continua (mejor ratio potencia/volumen, mayor sencillez constructiva etc.), por lo que se prefiere utilizar también en esta aplicación la máquina síncrona, y añadirle a la salida un rectificador que convierte la corriente en continua.

La principal desventaja de las máquinas alternas frente a la de corriente continua es la complejidad del control. Sin embargo, debido al desarrollo en las últimas décadas de convertidores electrónicos y métodos de control mediante accionamientos eléctricos, las máquinas de alterna han ido poco a poco reemplazando a las de continua en la mayoría de las aplicaciones.

En lo que concierne al campo de la generación eólica los diferentes fabricantes han experimentado con varios tipos de máquinas hallando en muchos casos resultados positivos, de manera que ninguna de las opciones ha llegado a imponerse aún. No siempre se han decantado por el uso de la máquina síncrona, (por ejemplo Gamesa emplea en sus aerogeneradores la MADA o máquina asíncrona doblemente alimentada). En todos los casos se acompaña la máquina con accionamientos eléctricos que facilitan su control.

5.2.3- TIPOS DE MÁQUINAS SÍNCRONAS

Por las formas constructivas del sistema de excitación, las máquinas síncronas se clasifican en máquinas de polos salientes y de polos lisos. La utilización de uno u otro tipo depende fundamentalmente de las velocidades a las que se trabaja.

Generalmente, las máquinas de bajo número de polos (alta velocidad), suelen ser de polos lisos ocurriendo justamente lo contrario (elevado número de polos y bajas velocidades) en el caso de máquinas de polos salientes.

Nuestro alternador es en realidad una mezcla de ambos tipos, lo cual como se verá más adelante acarrea algunos problemas a la hora de obtener algunos de los parámetros (principalmente inductancias en el eje directo y de cuadratura, L_d y L_q), debido a que los métodos de ensayo existentes están planteados bien para máquinas de polos lisos o de polos salientes.

En algunas máquinas síncronas los devanados del rotor se pueden sustituir por imanes permanentes, de tal manera que el campo magnético necesario es producido por estos en lugar de por corrientes eléctricas.

La principal ventaja de estas máquinas reside en que no es necesario transferir ninguna corriente al rotor (en movimiento), por lo que se pueden eliminar las escobillas (razón por la que se denomina a estas máquinas Brushless).

Las desventajas principales de las máquinas de imanes permanentes serían por otro lado la pérdida de control sobre la amplitud del campo magnético del rotor, y por otro el peor ratio potencia/volumen (para obtener grandes potencias se requieren imanes grandes, es decir, rotores grandes).

El alternador empleado en este proyecto no es de imanes permanentes, sino de rotor devanado. Sin embargo, la corriente introducida por el rotor se mantendrá en todo momento constante, lo que a efectos prácticos hace que nuestro alternador funcione de manera aproximada a como lo haría una máquina de imanes permanentes.

5.2.4- ECUACIONES DE LA MÁQUINA SÍNCRONA COMO GENERADOR

En una máquina síncrona la relación entre la velocidad de giro del rotor n (en rpm) y la frecuencia de las corrientes del estator depende del número de pares de polos p según la ecuación 5.1:

$$f = \frac{n \cdot p}{60} = \frac{\left(\frac{60}{2\pi} \cdot \omega_g\right) \cdot p}{60} = \frac{\omega_g \cdot p}{2\pi} \quad (5.1)$$

En su funcionamiento como generador, el devanado del rotor es alimentado con una corriente de excitación continua I_{ex} que proporciona un campo magnético Φ_0 , cuya curva de inducción en el entrehierro es de forma senoidal.

Si se aplica un par de giro en el eje del rotor, este se desplazará con una velocidad angular del generador ω_g , siendo el flujo visto por los devanados del inducido (estator) una función senoidal:

$$\phi(t) = \phi_0 \cdot N \cdot \text{sen}(\omega t) = \phi_0 \cdot N \cdot \text{sen}(2\pi \cdot f t) \quad (5.2)$$

Esta variación de flujo induce una *f.e.m.* igual a:

$$e(t) = -\frac{d\phi}{dt} = -N\phi_0 \cdot \text{sen}(\omega t) = -E_0 \cdot \text{sen}(\omega t) \quad (5.3)$$

Como en realidad el estator posee 3 devanados desfasados 120° , se obtiene:

$$e_1(t) = -E_0 \cdot \text{sen}(\omega t) \quad (5.4)$$

$$e_2(t) = -E_0 \cdot \text{sen}\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (5.5)$$

$$e_{31}(t) = -E_0 \cdot \text{sen}\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (5.6)$$

En valores eficaces, se puede representar la *f.e.m.* inducida como:

$$E_0 = K \cdot \phi_0 \cdot \omega_g \quad (5.7)$$

Donde K engloba varias variables constructivas de la máquina (número de espiras de los devanados del estator N...), y se puede hallar de forma empírica para cada valor de flujo magnético (o también para cada valor de corriente de excitación del rotor generadora de ese flujo, I_{ex}), como se verá más adelante.

Cuando por los devanados del estator circula una corriente, se dice que la máquina trabaja en carga (tanto si funciona como motor o como generador). En esta situación, la tensión a la salida del estator difiere con respecto a la *f.e.m.* inducida debido a la conjugación de los siguientes dos factores:

1- Al circular corriente por el devanado del estator se produce el efecto de reacción: El flujo disperso, al ser variable en el tiempo, genera en los devanados del estator una *f.e.m.* de autoinducción que puede representarse como de $X_S \cdot I_S$, donde X_S es la reactancia de autoinducción.

2- A esto hay que añadir la resistencia de los devanados, R_S .

En definitiva, estos dos factores originan una caída de tensión (como se verá después, en algunos casos puede llegar a ser una subida) que afectará a la relación de tensiones de la máquina, quedando así:

$$\vec{U}_S = \vec{E}_V - R_S \cdot \vec{I}_S - X_S \cdot \vec{I}_S j \quad (5.8)$$

La *f.e.m.* de vacío es E_V , pero la tensión real de salida del estator es U_S . La diferencia entre ambas dependerá no sólo de los valores de esas variables, sino también de la naturaleza de la carga.

A partir de la ecuación 5.8, el circuito equivalente de la salida de la máquina es el mostrado en la figura 5.8:

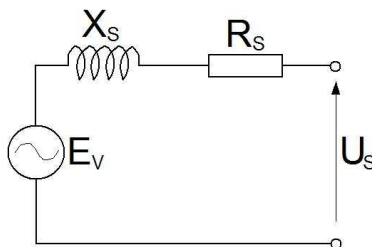


Fig. 5.8: Circuito equivalente de la salida de la máquina

Si la carga conectada a la salida es de carácter resistivo puro, la corriente estará en fase con la tensión, de tal manera que la tensión de salida U_S se verá reducida con respecto a E_V será como el del diagrama de la figura 5.9:

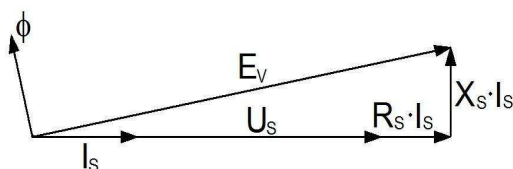


Fig. 5.9: Reacción de inducido con carga puramente resistiva

Si la carga es inductiva, la corriente estará retrasada con respecto a la tensión U_S un cierto ángulo ϕ , que nunca será mayor de $\pi/2$. La consecuencia es que se produce un efecto desmagnetizante, como se muestra en la figura 5.10, agudiza la diferencia entre U_S y E_V :

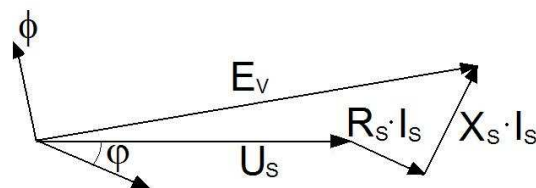


Fig. 5.10: Reacción de inducido con carga inductiva

Si la carga es capacitiva, la corriente estará adelantada con respecto a U_S , y el efecto de la reactancia de autoinducción será, al contrario de lo que ocurriría con la carga inductiva magnetizante. Dependiendo del ángulo ϕ y de los valores de R_S y X_S , Incluso puede darse el caso en que U_S sea mayor que E_V .

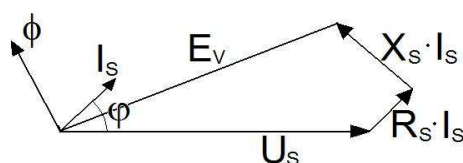


Fig. 5.11: Reacción de inducido con carga capacitiva

5.2.5- CARACTERÍSTICA DE VACÍO

La máquina funciona en vacío cuando no se acopla ninguna carga a la salida del estator.

Como se ha visto ya en la ecuación 5.7, la tensión de inducido E_V es proporcional al flujo de inducción, y por tanto también a la corriente del rotor I_{ex} que genera dicho flujo.

La relación entre ambas variables es lineal hasta que se alcanza el punto de saturación del flujo magnético. Cuando este punto es sobrepasado, la relación deja de ser lineal, ya que aunque se siga aumentando la corriente el flujo magnético apenas seguirá aumentando debido a que la máquina ya está saturada. La tensión inducida tendrá un comportamiento idéntico al del flujo.

La figura 5.12 muestra una típica curva de característica de vacío:

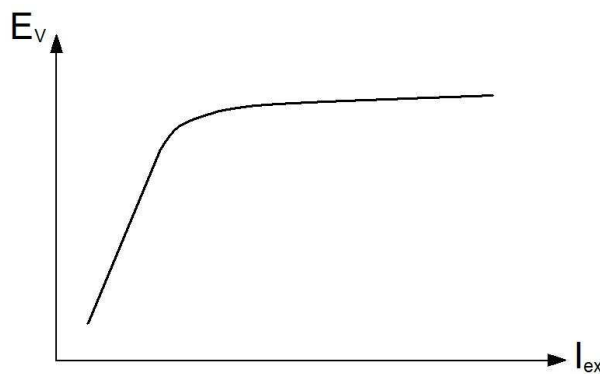


Fig. 5.12: Característica de vacío

La característica de vacío depende también de la velocidad de giro del rotor, de manera que para cada velocidad se tiene una curva distinta:

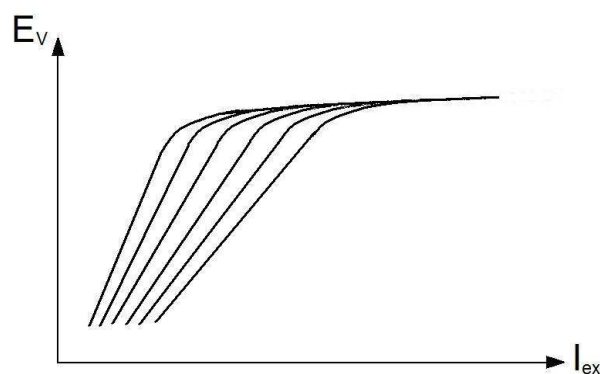


Fig. 5.13: Característica de vacío para distintas velocidades de giro del rotor

De estas curvas se pueden obtener también los valores de la variable K que se mencionaba en la ecuación 5.7. Esta variable aporta la relación entre la tensión inducida E_V y la velocidad de giro del rotor ω para cada valor de corriente de excitación I_{ex} . Como es de suponer K sólo es válida para la zona lineal de las curvas, cuando la máquina no está saturada.

5.2.6- CARACTERÍSTICA DE CORTOCIRCUITO

Es la relación entre la corriente de excitación del rotor I_{ex} y la corriente de salida del estator I_s cuando los bornes de salida de los devanados del estator están cortocircuitados.

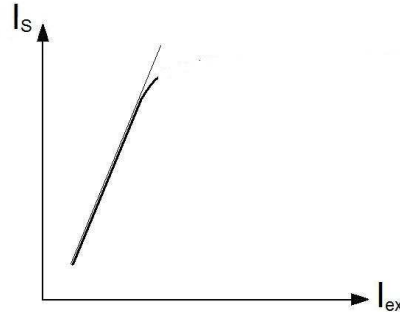


Fig. 5.14: Característica de cortocircuito

Habitualmente se halla la curva para la velocidad nominal, pero al igual que en el ensayo de vacío, se puede obtener la curva para cada valor de velocidad.

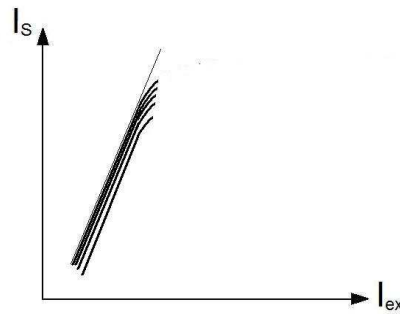


Fig. 5.15: Característica de cortocircuito para distintas velocidades

5.2.7- IMPEDANCIA SÍNCRONA NO SATURADA

A partir de los valores de las curvas de vacío y cortocircuito, se puede obtener la impedancia síncrona Z_S no saturada para cada valor de I_{ex} y ω :

$$Z_S(I_{ex}, \omega) = \frac{E_V(I_{ex}, \omega)}{I_S(I_{ex}, \omega)} \quad (5.9)$$

En la mayoría de los casos se puede despreciar R_S frente a X_S , por lo que la expresión anterior valdría también para la reactancia síncrona no saturada:

$$X_S(I_{ex}, \omega) \approx \frac{E_V(I_{ex}, \omega)}{I_S(I_{ex}, \omega)} \quad (5.10)$$

De dicho valor de impedancia se puede obtener la inductancia síncrona:

$$L_S = \frac{X_S}{2\pi f} \quad (5.11)$$

5.2.8- BALANCE DE POTENCIAS DE UN GENERADOR SÍNCRONO

La figura 5.16 muestra el balance de potencias de un generador síncrono:

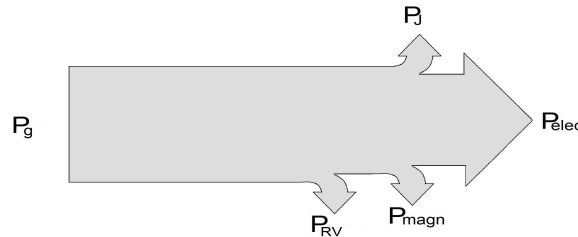


Fig. 5.16: Balance de potencias en un generador síncrono

$$P_{entrada} = P_{salida} \rightarrow P_g = P_{elec} + P_J + P_{magn} + P_{RV} \quad (5.12)$$

P_g : potencia mecánica de giro del rotor.

P_{elec} : potencia eléctrica obtenida en los devanados del estator.

P_J : pérdidas por efecto Joule en los devanados del estator.

P_{RV} : pérdidas mecánicas por rozamiento y ventilación.

P_{magn} : pérdidas magnéticas.

La potencia mecánica P_g puede expresarse como:

$$P_g = T_{em} \cdot \omega_g \quad (5.13)$$

La potencia eléctrica en el estator P_{elec} es:

$$P_{elec} = 3 \cdot U_s \cdot I_s \quad (5.14)$$

Las pérdidas por efecto Joule en el estator P_J son:

$$P_J = 3 \cdot R_s \cdot I_s^2 \quad (5.15)$$

Se han omitido las potencias relativas al rotor (pérdidas en los devanados del rotor, etc.) porque al mantenerse la corriente del rotor constante estas potencias no van a cambiar en el tiempo, de forma que no afectan al cálculo.

Las pérdidas por rozamiento y ventilación P_{RV} dependen de la velocidad de giro, pero suponen habitualmente una fracción muy pequeña de la potencia total, por lo que se considera razonable despreciarlas en el análisis a realizar.

Las pérdidas magnéticas P_{magn} suponen por otro lado una fracción considerable de la potencia total, de manera que el rendimiento de la máquina puede verse sensiblemente reducido debido a las mismas (hasta un 70%). Sin embargo, es muy difícil hallar una expresión que permita calcularlas para distintos regímenes de funcionamiento, por lo que se ha decidido obviar estas pérdidas.

En definitiva, la ecuación del balance de potencias es la siguiente:

$$T_{em} \cdot \omega_g = 3U_s \cdot I_s + 3R_s \cdot I_s^2 \quad (5.16)$$

5.3- MODELO DEL GENERADOR

PSIM ha creado algunos modelos de generadores síncronos cuyas ecuaciones están ya definidas por el programa, de forma que para utilizarlos sólo hay que introducir el valor de los parámetros que se exigen en cada caso. Se van a estudiar dichos modelos con el objeto de averiguar si alguno de ellos sirve para nuestro alternador. Para averiguar esto, se observará si los parámetros exigidos por cada modelo coinciden con las variables planteadas en las ecuaciones del apartado anterior.

Existen cuatro modelos de generador definidos por PSIM:

- 3 phase synchronous machine
- 3 phase synchronous machine (current type interface)
- Permanent magnet synchronous machine
- Permanent magnet synchronous machine (voltage type interface)

Los modelos a) y b) se corresponden con máquinas síncronas de rotor bobinado como la nuestra, mientras que los modelos c) y d) son máquinas síncronas de imanes permanentes. A continuación se muestran los parámetros exigidos en los menús de selección de cada uno de los 4 modelos de máquina:

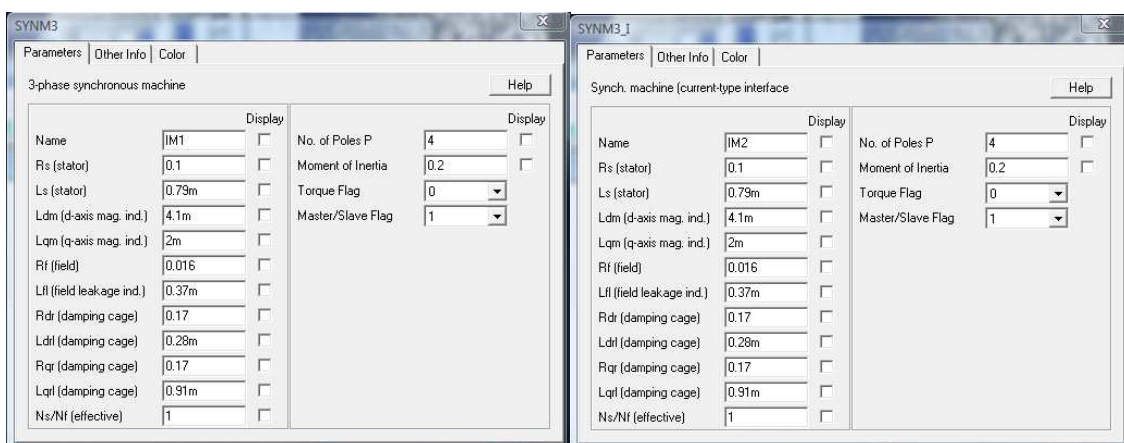


Fig. 5.17: Parámetros necesarios para emplear los modelos a) y b)

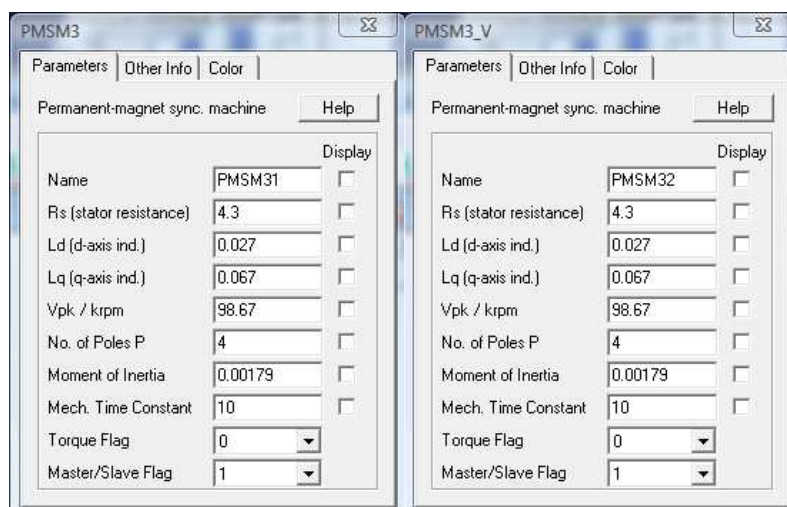


Fig. 5.18: Parámetros necesarios para emplear los modelos c) y d)

5.3.1- ELECCIÓN DEL MODELO DE GENERADOR

Como puede observarse, los menús de selección de parámetros son iguales dos a dos: las dos máquinas síncronas de rotor bobinado a) y b) poseen los mismos parámetros de entrada, y ocurre lo mismo con las dos máquinas de imanes permanentes c) y d). En un principio cabría pensar que lo más lógico es escoger uno de los modelos a) o b) correspondientes a las máquinas de rotor bobinado, pues nuestro alternador también posee un rotor bobinado. Pero como se verá a continuación, hay razones para no hacer esto:

La principal diferencia entre la máquina de rotor bobinado y la de imanes permanentes es que con la primera se puede controlar y modificar la excitación introduciendo más o menos corriente por el rotor, mientras que en la segunda esto no es posible (el campo magnético generado en el rotor depende de las dimensiones del imán y del material ferromagnético empleado, que son necesariamente constantes). En nuestro sistema se va a mantener la corriente de excitación de la máquina I_{ex} siempre constante, por lo que siempre se generará el mismo valor constante de campo magnético en el rotor. Es decir, a efectos prácticos nuestra máquina funcionará básicamente igual a como lo haría una de imanes permanentes.

Por otro lado, si se observan los menús de selección de los modelos se comprueba con facilidad que el número de parámetros exigido en los modelos a) y b) es mucho mayor que el exigido en los modelos c) y d), lo que conlleva que el número de ensayos necesarios para poder parametrizar completamente la máquina también sea mucho mayor.

En consecuencia, parece más lógico escoger un modelo correspondiente a la máquina de imanes permanentes c) o d), ya que dichos modelos también se adecuan a las condiciones de nuestra máquina y además facilitan notablemente la caracterización de sus parámetros.

5.3.2- SUSTITUCIÓN DE L_d Y L_q POR L_s

Entre los parámetros que aparecen en el menú de selección de los modelos c) y d) se encuentran la inductancia en el eje directo L_d y la inductancia en el eje de cuadratura L_q . Aunque estos parámetros no se han incluido en las ecuaciones de cálculo de la redacción final de este proyecto, inicialmente sí fueron contemplados. De hecho, se llegaron a realizar varios ensayos al alternador con el objetivo de determinar su valor. Sin embargo, no fue posible hallar dichos valores con ninguno de los ensayos realizados.

Los ensayos se diferenciaban unos de otros en el método empleado para calcular los valores de las inductancias L_d y L_q (en función de las expresiones utilizadas para la obtención de L_d y L_q era necesario medir unos u otros parámetros). Los ensayos también se diferenciaban unos de otros en función del tipo de máquina para el que estaban planteados. Todos los ensayos realizados estaban definidos para algún tipo concreto de máquina, pero el alternador que poseemos no es en realidad una máquina de una clase

concreta, sino una mezcla entre una máquina de polos lisos y otra de polos salientes. El hecho de que los resultados en todos los casos fueran inconcluyentes conduce a pensar que ninguno de los ensayos planteados se ajustaba a las condiciones de funcionamiento de nuestro alternador.

Para solventar este problema se decidió simplificar la modelización del generador, considerando que las inductancias en el eje directo L_d y en el eje de cuadratura L_q son iguales y poseen ambas un valor igual a la inductancia del estator L_s . Parece razonablemente factible asumir esta equivalencia e incluso aproximar su valor al de la impedancia del estator, lo cual permite hallar la inductancia de la máquina mediante sencillos ensayos de vacío y cortocircuito, como se ha explicado en el apartado de ecuaciones.

5.3.3- CONSTANTE DE LA MÁQUINA (K o $V_{PK}/krpm$)

En el apartado de ecuaciones se ha explicado cómo la constante K se obtiene a partir de los resultados del ensayo de vacío. K es la relación entre la tensión de vacío y la velocidad de giro del generador, y es una constante de la máquina que permitirá hallar el valor de la tensión inducida E_V para cualquier velocidad de trabajo del generador n .

Habitualmente se calcula el valor de K para distintos valores de tensión E_V , velocidad n y corriente de excitación I_{ex} , y después se halla el valor medio de K para poder emplearlo en el modelo del generador. Pero en el modelo de una máquina permanente definido por el programa PSIM, el valor exigido no es K , sino el valor de tensión de pico correspondiente a $n = 1000$ rpm, en unidades de $V_{pico}/krpm$ (valor al que se denomina $V_{PK}/krpm$, ver menú de selección de la figura 5.18). Es decir, el valor que se debe introducir en el menú de selección de parámetros del modelo de la máquina es simplemente igual al valor de tensión inducida de pico correspondiente a la velocidad de 1000rpm.

5.3.4- MODELO COMPLETO DEL GENERADOR

El generador debe estar precedido por un interfaz mecánico-eléctrico que transforme la señal. Dicho interfaz debe colocarse en modo “master”, pues siempre será quien de la orden de entrada al generador (el valor de la velocidad de giro ω_g). Además, a partir dicha velocidad y del par electromagnético que calcularán la potencia P_g y la energía E_g producida en el generador:

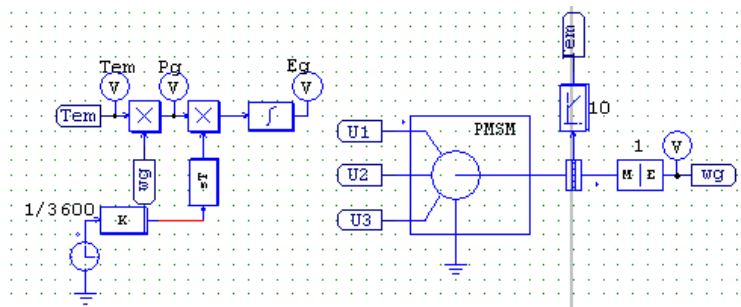


Fig. 5.19: Modelo completo del generador

5.4- CARACTERIZACIÓN DEL GENERADOR

5.4.1- RESISTENCIA DEL ESTATOR R_S

Condiciones del ensayo:

- Se han desconectado los devanados del rectificador trifásico.
- El rectificador se ha extraído del alternador.
- Temperatura: aprox. 22°C.
- Miliamperímetro: multímetro digital TES2700 nº serie 030804022
- Milivoltímetro: multímetro digital TES2700 nº serie 010906202
- Método de medición empleado: voltiamperimétrico de conexión corta.

Los devanados son conectados en triángulo. Se quiere obtener la resistencia por fase, pero la resistencia medida tendrá un valor distinto debido a la forma en la que se han conectado los devanados:

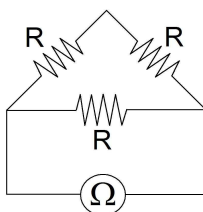


Fig. 5.24: Circuito equivalente de R_S

A partir de la medición realizada R_{med} , la resistencia en cada fase del estator R_S se calculará mediante la siguiente expresión:

$$R_{med} = \frac{2R_S \cdot R_S}{2R_S + R_S} = \frac{2R_S}{3} \rightarrow R_S = \frac{3R_{med}}{2} \quad (\text{ec. 5.17})$$

Calibración:

Valor exacto	Valor medido	Corrección
25 mA	25,47 mA	-0,47 mA
58 mA	58,95 mA	-0,95 mA
94 mA	95,65 mA	-1,65 mA
2,5 mV	2,4 mV	+0,1 mV
7 mV	6,9 mV	+0,1 mV
11 mV	10,9 mV	+0,1 mV

Resultado:

Medidas tomadas entre fases extremas

Tensión (mV) medida	Corriente (mA) medida	Tensión corregida (mV)	Corriente corregida (mA)	Resistencia (mΩ)	Incertidumbre (mΩ)
3,0	25,84	3,1	25,37	122	±11
6,8	58,1	6,9	57,15	121	±10
11,2	94,3	11,3	92,65	122	±20
2,8	24,86	2,9	24,39	119	
6,7	58,1	6,8	57,15	119	
11,6	98,7	11,7	97,05	121	

Medidas tomadas entre fase central y fase extrema 1 (marcada de azul)

Tensión (mV) medida	Corriente (mA) medida	Tensión corregida (mV)	Corriente corregida (mA)	Resistencia (mΩ)	Incertidumbre (mΩ)
2,6	24,70	2,7	24,23	111	
6,3	59,8	6,4	58,85	109	
10,4	98,9	10,5	97,25	108	
2,8	27,50	2,9	27,03	107	
6,1	57,8	6,2	56,85	109	
10,5	98,9	10,6	97,25	109	

Entre fase central y fase extrema 2 (sin marcar)

Tensión (mV) medida	Corriente (mA) medida	Tensión corregida (mV)	Corriente corregida (mA)	Resistencia (mΩ)	Incertidumbre (mΩ)
3,0	27,40	3,1	26,93	115	
6,5	58,7	6,6	57,75	114	
10,3	93,7	10,4	92,05	113	
2,7	25,43	2,8	24,96	112	
6,5	58,9	6,6	57,95	114	
10,3	93,5	10,4	91,85	113	

El promedio de todos esos valores es $R_{med} = 114,33\text{m}\Omega$. A partir de la ecuación 5.17, $R_S = 171,5\text{m}\Omega/\text{fase}$

5.4.2- NÚMERO DE PARES DE POLOS p

Por inspección, el número de polos del rotor es 12, luego el número de pares de polos debería ser 6. Se realizará un ensayo para comprobar si esto es cierto.

Condiciones del ensayo:

- Se hace funcionar al alternador con excitación nominal y en vacío.
- Temperatura: aprox. 22°C
- Osciloscopio: Tektronix TDS3014B nº serie: B032115
- Tacómetro:

Resultado:

Se hace girar la máquina a 1000rpm. Se observa que la frecuencia medida con el osciloscopio digital es de 100Hz. A partir de la ecuación 5.39 es posible averiguar el número de pares de polos p :

$$p = \frac{60 \cdot f}{n} = \frac{60 \cdot 100}{1000} = 6$$

5.4.3- ENSAYO DE VACÍO

Objetivo:

El objetivo de este ensayo es hallar dos variables:

- La constante de la máquina K que aporta la relación entre la fem inducida E_V y la velocidad de giro del generador ω_g .
- La inductancia de los devanados del estator L_S , para lo cual también será necesario realizar más adelante el ensayo de cortocircuito: a partir de la relación entre los valores de E_V obtenidos en este ensayo y los de I_S obtenidos en el ensayo de cortocircuito se hallará la reactancia en el estator X_S .

Condiciones del ensayo:

Para llevar a cabo el ensayo se emplea una máquina de corriente continua del laboratorio a modo de turbina, acoplando a dicha máquina la polea de la multiplicadora. Se sitúa la bancada al lado de la máquina del laboratorio, atornillándola a la misma. A continuación se coloca el alternador sobre la bancada.

Una vez alineados los ejes de la polea y el alternador se coloca entre ambos la correa de la multiplicadora y se ajusta la posición del alternador sobre la bancada para obtener un tensado correcto de la correa. Los devanados del rotor son alimentados mediante una fuente de tensión.

- Amperímetro: multímetro digital TES2700 nº serie 030804022
 - Voltímetro: multímetro digital TES2700 nº serie 010906202
- (Los multímetros se emplearon en ensayos previos y se consideran calibrados).

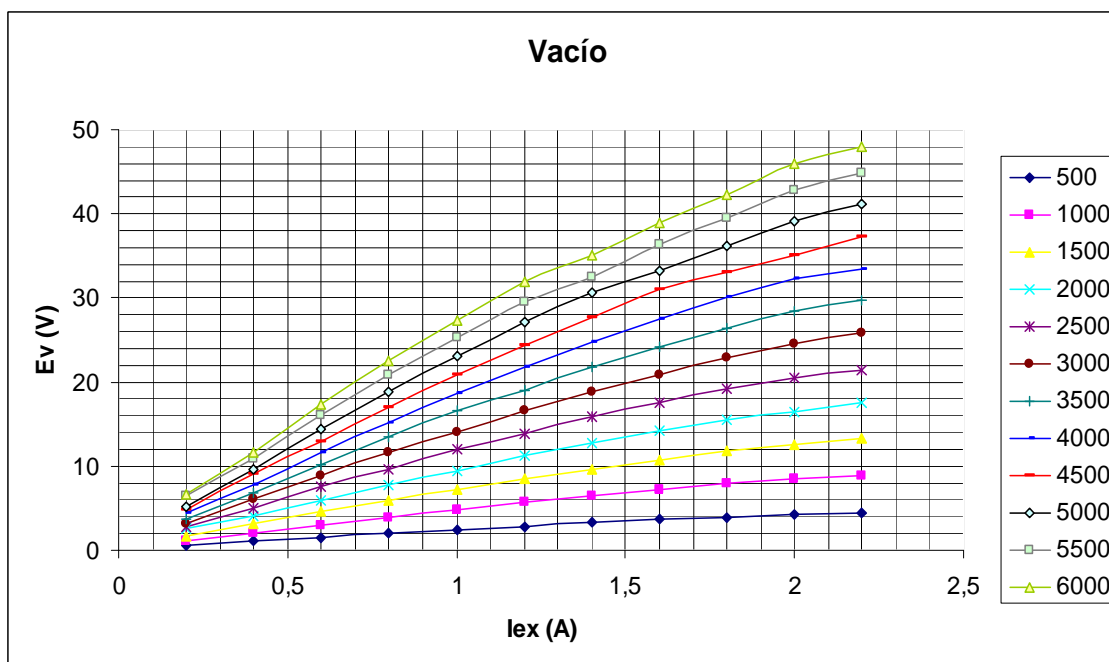
Descripción del ensayo:

Se hace funcionar la máquina a distintas velocidades n (todos los valores múltiplos de 500rpm hasta alcanzar las 6000rpm), con lo que se cubre gran parte de su rango de funcionamiento. Los devanados del rotor son alimentados por la fuente de tensión. Para cada uno de esos valores de velocidad n mencionados se introducen diferentes valores de corriente de excitación por el rotor, cubriendo todos los valores múltiplos de 0,2A hasta alcanzar los 2,2A.

Se miden los valores de tensión en el estator U_S para cada valor de n y de I_{ex} . En este caso, al funcionar la máquina en vacío y no haber corriente en los devanados del estator, dicha tensión U_S es igual a la fem inducida E_V .

Resultado:

La gráfica inferior muestra los valores de E_V obtenidos para cada valor de n y de I_{ex} . Los cálculos realizados para la obtención de dicha gráfica están disponibles en la hoja Excel adjunta *Ensayos de vacío y cortocircuito del alternador*.

Fig. 5.25: Resultados del ensayo de vacío: E_v en función de I_{ex} y n

5.4.4- CONSTANTE DE LA MÁQUINA (K o $V_{PK}/krpm$)

Tal y como se ha explicado en apartados anteriores, de la relación entre los valores obtenidos de ω y E_v se puede hallar K (ecuación 5.7). Para la obtención de ω primero habrá que convertir las unidades de la velocidad n (rpm) en rad/s.

$$K = \frac{E_v}{\omega}$$

Como la corriente de excitación se mantendrá siempre constante en 2A, basta con escoger los valores obtenidos de ω y E_v para ese punto de I_{ex} . Los resultados son mostrados en la siguiente tabla:

n (rpm)	ω (rad/s)	E_v	K
500	52,36	4,26	0,081359817
1000	104,72	8,45	0,080691367
1500	157,08	12,57	0,080022918
2000	209,44	16,51	0,078829259
2500	261,8	20,56	0,078533231
3000	314,16	24,56	0,078176725
3500	366,52	28,46	0,077649242
4000	418,88	32,38	0,077301375
4500	471,24	35,1	0,074484339
5000	523,6	39,1	0,074675325
5500	575,96	42,8	0,074310716
6000	628,32	45,9	0,073051948

Fig. 5.26: Valores de K obtenidos para corriente de excitación $I_{ex}=2A$

El promedio de esos valores es $K=0,077 \text{ V}/(\text{rad/s})$.

Sin embargo, el valor que se debe introducir en el menú de selección de PSIM no es K , sino $V_{pico}/krpm$. Su valor se corresponde con el de la tensión de pico E_V para una velocidad n de 1000 rpm. En una máquina de rotor bobinado habitual $V_{pico}/krpm$ podría variar en función de la corriente de excitación I_{ex} , pero como en nuestra máquina esta corriente se mantendrá siempre constante en 2A, el valor de $V_{pico}/krpm$ se obtendrá a partir de la tensión correspondiente a dicha corriente en la tabla de la figura 5.26: 8,45V.

n (rpm)	I_{ex} (A)	E_V (V)
1000	2	8,45

Fig. 5.26: Tensión eficaz E_V correspondiente a velocidad $n = 1000\text{rpm}$ y corriente $I_{ex} = 2\text{A}$

El valor de E_V mostrado en la tabla es el valor eficaz, por lo que el valor de pico será el siguiente:

$$V_{PK} / krpm = \frac{8.45 \cdot \sqrt{2}V}{1krpm} = 11,95V_{pico} / krpm$$

5.4.5- ENSAYO DE CORTOCIRCUITO

Objetivo:

El objetivo de este ensayo es hallar la inductancia del estator L_S , para lo cual también se tomarán datos del ensayo de vacío realizado anteriormente.

Condiciones del ensayo:

Se mantiene el alternador en la misma posición que en el ensayo de vacío: sobre la bancada y unido mediante la correa de transmisión a la polea que se ha acoplado al motor eléctrico del laboratorio.

Los multímetros empleados se han usado también en los ensayos anteriores, por lo que se consideran ya calibrados.

Los bornes de las 3 fases de la salida del estator se conectan en triángulo.

Descripción del ensayo:

De nuevo se hace funcionar la máquina a distintas velocidades n (todos los valores múltiplos de 500rpm hasta alcanzar las 6000rpm).

Los devanados del rotor son alimentados por la fuente de tensión. Al igual que en el ensayo anterior, para cada valor de velocidad n se introducen valores de corriente de excitación por el rotor I_{ex} múltiplos de 0,2A hasta alcanzar los 2,2A.

Se miden los valores de corriente de salida en el estator en cada una de las tres fases empleando tres amperímetros. Dichos valores serán la corriente de línea, por lo que para hallar los valores de fase de I_S se dividirá entre $\sqrt{3}$.

Resultado:

La gráfica inferior muestra los valores de I_S obtenidos para cada valor de n y de I_{ex} . Los cálculos realizados pueden hallarse en la hoja Excel adjunta *Ensayos de vacío y cortocircuito del alternador*.

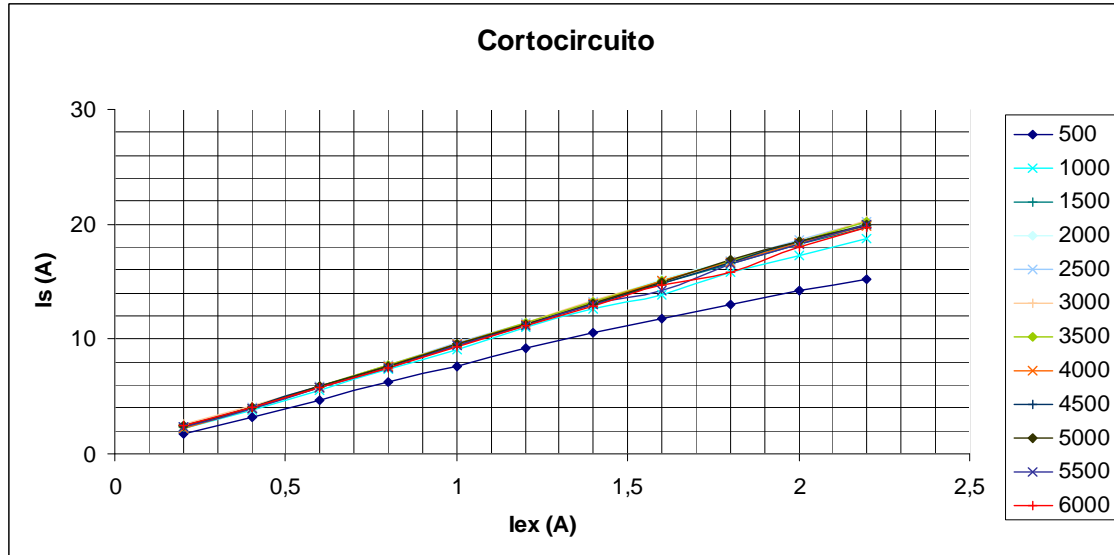


Fig. 5.27: Resultados del ensayo de cortocircuito: I_S en función de I_{ex} y n

5.4.6- INDUCTANCIA SÍNCRONA L_S

De la relación entre los valores de E_V y de I_S obtenidos en los ensayos de vacío y cortocircuito respectivamente se obtiene la reactancia del estator X_S :

$$X_S \approx \frac{E_V = f(n, I_{ex})}{I_S = f(n, I_{ex})}$$

Como en ambos ensayos se han empleado los mismos valores de velocidad n y corriente de excitación I_{ex} , se realiza la división entre E_V e I_S para cada uno de esos puntos, hallando como resultado la siguiente tabla:

REACTANCIA $X_S=f(E_V, I_S)$		I_{ex} (A)										
		0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,6	1,8	2	2,2
n (rpm)	500	0,21	0,196	0,189	0,185	0,186	0,18	0,179	0,178	0,175	0,173	0,167
	1000	0,311	0,305	0,317	0,309	0,309	0,3	0,298	0,302	0,286	0,282	0,275
	1500	0,417	0,445	0,454	0,454	0,441	0,432	0,425	0,42	0,41	0,399	0,388
	2000	0,626	0,593	0,595	0,583	0,578	0,568	0,557	0,541	0,536	0,517	0,502
	2500	0,68	0,713	0,742	0,727	0,715	0,703	0,69	0,673	0,66	0,639	0,61
	3000	0,719	0,845	0,865	0,873	0,852	0,842	0,821	0,806	0,785	0,765	0,732
	3500	0,901	0,971	1,005	1,006	1,001	0,97	0,946	0,932	0,908	0,886	0,85
	4000	1,116	1,128	1,173	1,157	1,123	1,113	1,096	1,055	1,038	1,015	0,969
	4500	1,2	1,311	1,281	1,291	1,271	1,244	1,227	1,207	1,151	1,096	1,085
	5000	1,233	1,372	1,433	1,439	1,395	1,381	1,35	1,286	1,235	1,22	1,188
	5500	1,571	1,597	1,601	1,607	1,556	1,524	1,44	1,476	1,377	1,352	1,298
	6000	1,57	1,646	1,748	1,742	1,696	1,657	1,571	1,536	1,546	1,472	1,405

Fig. 5.28: Reactancia del estator X_S

De la ecuación 5.11 dividiendo por $2\pi f$ cada esas reactancias se obtienen los valores de inductancia L_S :

$$L_S = \frac{X_s}{2\pi f}$$

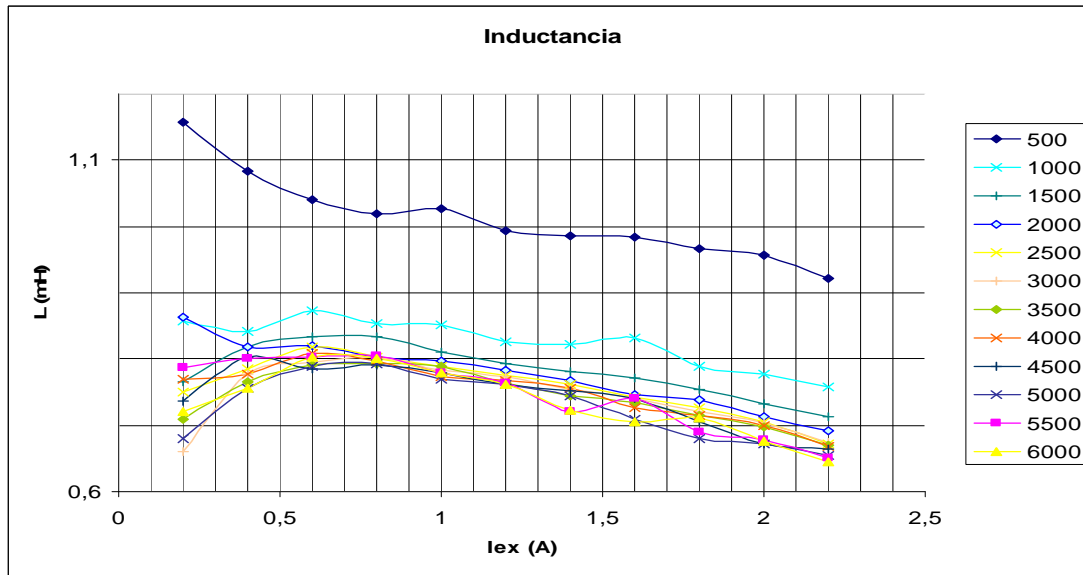


Fig. 5.29: Inductancia del estator L_S

Finalmente se calculará el promedio de inductancia correspondiente a la corriente de excitación de trabajo $I_{ex}=2A$. Al realizar el promedio no se tendrá en cuenta el valor de L_S correspondiente a 500rpm, ya que se aleja mucho del resto de valores y además la tensión producida con esa velocidad es tan pequeña que no es útil.

El resultado es $L_S = 0,702mH$ (todos los valores están disponibles en la hoja Excel adjunta *Ensayos de vacío y cortocircuito del alternador.*).

6- COMPONENTES DEL SISTEMA: RECTIFICADOR

6.1- DESCRIPCIÓN DEL RECTIFICADOR

La función del rectificador es convertir la tensión de salida del generador (trifásica y senoidal) en una tensión monofásica y continua.

Existen varios modelos de rectificador: de diodos, de tiristores, y mixtos. Los puentes rectificadores que poseen tiristores o son mixtos poseen la ventaja de permitir el control del disparo de los tiristores, de manera que no sólo se rectifica la tensión, sino que además se puede controlar su valor de salida.

No obstante, no interesa en nuestro caso realizar un control del valor de salida de la tensión, pues eso se hará posteriormente en el convertidor reductor. Esto permite escoger la opción más sencilla y barata, es decir, el puente rectificador de diodos.

Por otro lado, los puentes de diodos pueden ser tanto monofásicos (una única tensión de entrada senoidal o trifásicos (tres tensiones senoidales desfasadas 120° entre sí a la entrada)). En nuestro sistema se necesita rectificar la salida alterna del generador, que es trifásica, luego el rectificador necesario es un puente de diodos trifásico.

6.2- FUNCIONAMIENTO Y ECUACIONES DEL RECTIFICADOR

El circuito eléctrico de un rectificador de diodos es el siguiente:

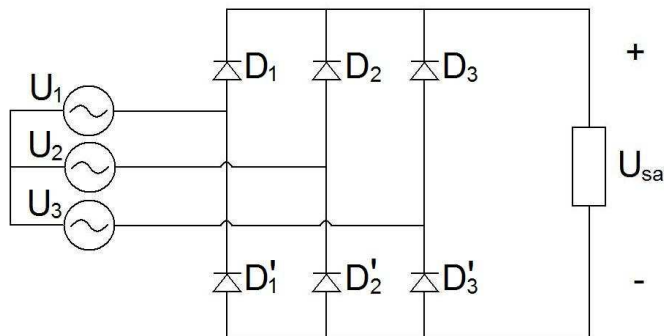


Fig. 6.1: Puente rectificador trifásico de diodos

Se pueden representar las 3 tensiones de salida del generador como 3 fuentes monofásicas y senoidales de tensión. El puente en sí se divide en dos mitades, una superior (por donde la corriente va hacia la carga) y otra inferior (por donde la corriente vuelve de la carga). En cada una de las mitades se tienen 3 diodos, uno para cada fase. Las salidas de las 3 fases están conectadas a la carga.

6.2.1- CONDUCCIÓN EN LA MITAD SUPERIOR DEL PUENTE

Si se observa la mitad superior del puente, se descubrirá rápidamente que nunca podrá conducir al mismo tiempo más de un diodo. Por ejemplo, si D_1 y D_2 condujeran al mismo tiempo, la corriente que circularía por el conductor de cada uno de los diodos tendería a bloquear el otro diodo. Si la corriente que circula por D_1 fuera mayor que la que circula por D_2 , dicha corriente bloquearía el diodo D_2 , apagándolo; y viceversa.

En definitiva, conducirá en cada momento el diodo por cuya rama circule la mayor corriente. Como la amplitud de cada una de esas corrientes depende a su vez de la tensión de la fase correspondiente, serán las ondas de la tensión las que marquen las pautas de encendido y apagado de los diodos de la mitad superior D_1 , D_2 y D_3 .

La figura 4.2 muestra la evolución de las 3 tensiones de entrada en el tiempo, y su efecto sobre la conducción de los diodos de la mitad superior:

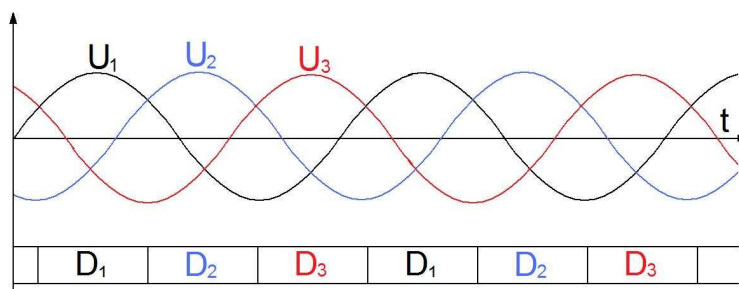


Fig. 4.2: Encendido y apagado de los diodos D_1 , D_2 y D_3

6.2.2- CONDUCCIÓN EN LA MITAD INFERIOR DEL PUEBTE

En la mitad inferior del puente ocurrirá algo similar con los diodos D_1' , D_2' y D_3' , donde se sitúan las ramas de vuelta de la corriente. Sin embargo, las ramas de vuelta de la corriente están conectadas a los terminales negativos de las fuentes de tensión que se tienen a la entrada. Por tanto, la rama con mayor corriente será aquella que posea el valor de tensión más negativo, pues ésta será la que aporte el diferencial de tensión más elevado.

La consecuencia es que la conducción de los diodos D_1' , D_2' y D_3' quedará como se muestra en la figura 6.3:

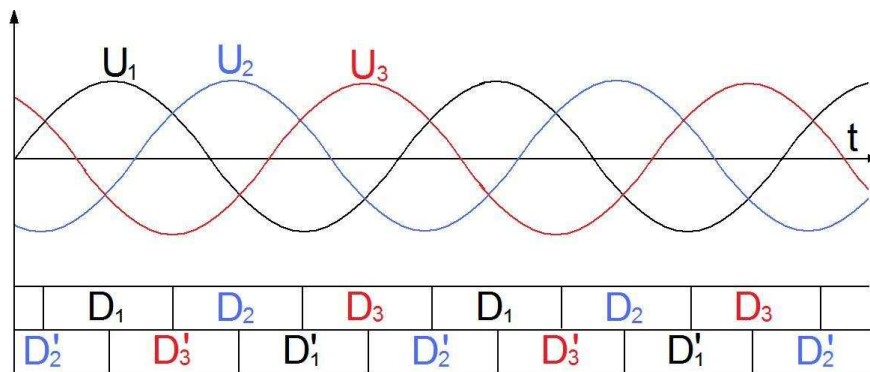


Fig. 6.3: Encendido y apagado de los diodos superiores e inferiores

En realidad, resulta que debido a la naturaleza inductiva de la fuente de tensión (el generador), la corriente estará ligeramente desfasada con respecto a la tensión. Esto generará el conocido como efecto relevo, que supone un ligero retardo del encendido y apagado de los diodos con respecto a las conmutaciones de la tensión.

Debido a ello, el encendido y apagado en realidad el comportamiento de los semiconductores será el mostrado en la figura 4.4:

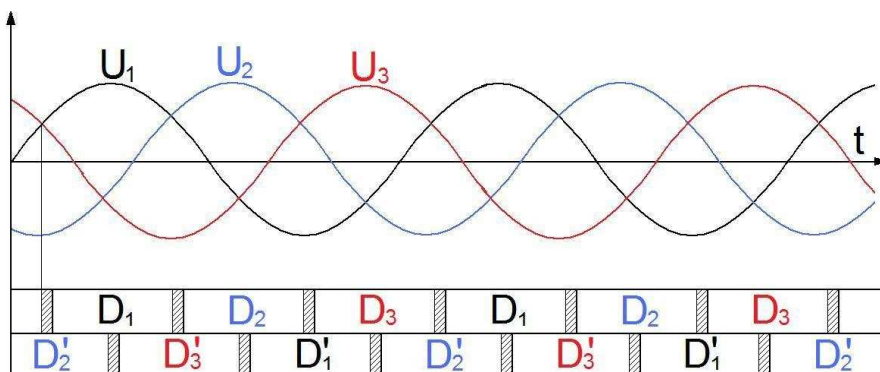
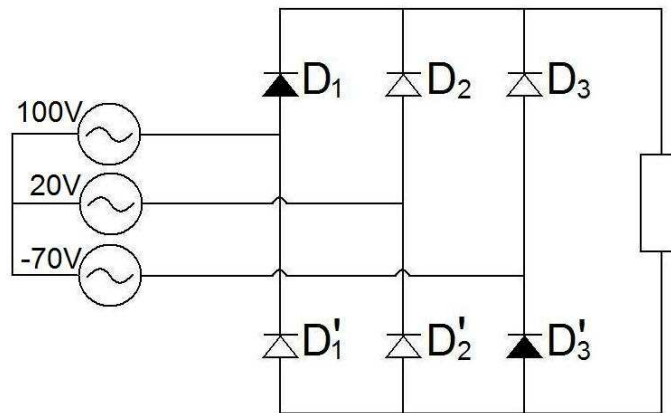
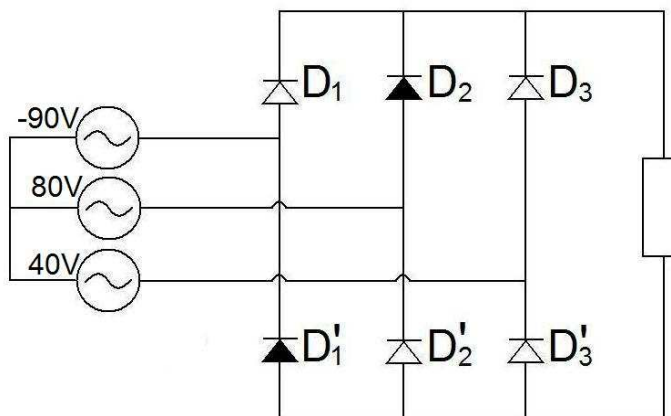


Fig. 6.4: Encendido y apagado de los diodos con relevo

El resultado obtenido en la salida será siempre la suma de las dos tensiones aportadas por las dos fuentes que estén en cada momento en funcionamiento.

6.2.3- TENSIÓN DE SALIDA

La figura 6.5 es un ejemplo de cuales serían los diodos encendidos para unos valores de tensión en cada fase dados.

Fig. 6.5: Ejemplo de conducción de D_1 , D'_3 Fig. 6.6: Ejemplo de conducción de D_2 , D'_1

Por lo tanto, El resultado será el siguiente:

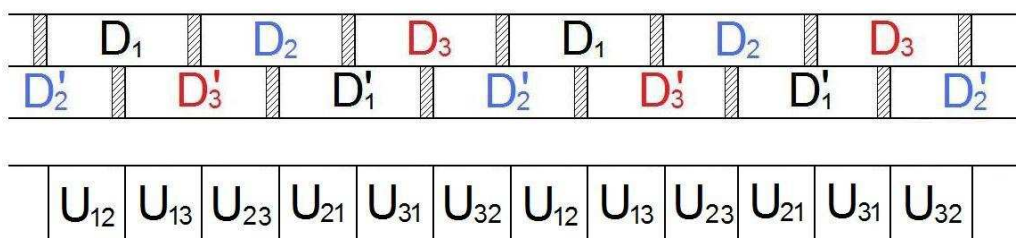


Fig. 6.7: Suma de las tensiones a la salida

Donde los valores de las tensiones mostradas en la figura 6.5 son, en general:

$$U_{sa} = U_a - U_b \quad (6.1)$$

Con lo que la onda de la tensión de salida es:

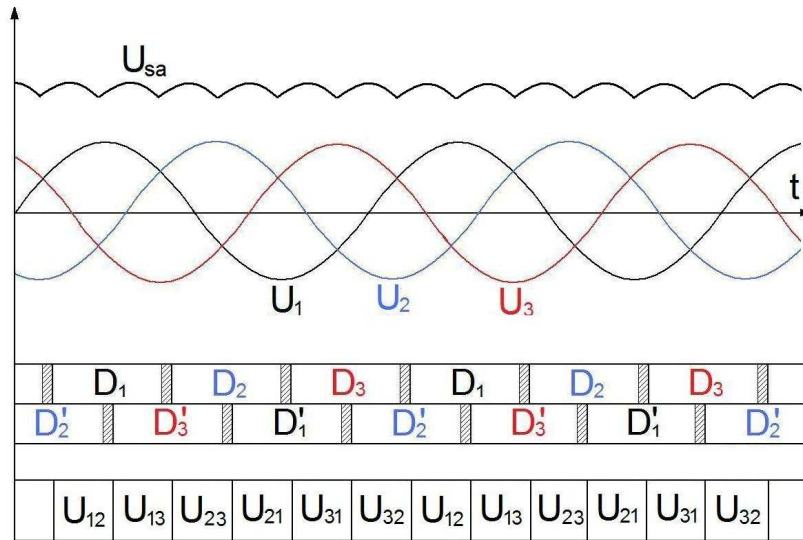


Fig. 6.8: Tensión de salida del rectificador

El valor de esa onda se obtiene mediante la ecuación 6.2:

$$U_{sa} = \frac{3 \cdot \sqrt{6}}{\pi} \cdot U_{ent} \quad (6.2)$$

Donde U_{ent} es igual a la tensión eficaz de cada una de las fases.

En conclusión, se obtiene a la salida una onda casi continua, que en realidad tiene un pequeño rizado cuya frecuencia es 6 veces mayor que la de las tensiones de entrada. El rizado se puede reducir más colocando un condensador a la salida:

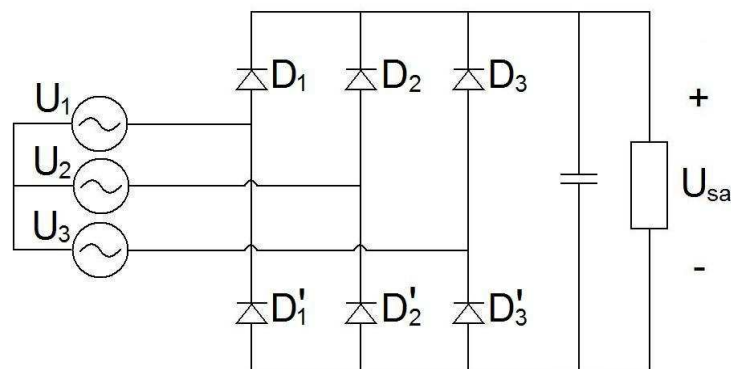


Fig. 6.9: Puente rectificador trifásico de diodos con condensador para reducir el rizado

Pero como se verá posteriormente, no va a ser necesario colocar ningún condensador a la salida del rectificador, debido a que se empleará también un condensador para representar uno de los parámetros internos de la batería. Casualmente, dicho condensador estará situado a la entrada de la batería y en paralelo (es decir, a la salida del rectificador). Además su valor será bastante elevado, por lo que filtrará la onda de salida del rectificador sin problemas.

6.3- MODELO DEL RECTIFICADOR

El rectificador puede representarse en PSIM usando el circuito mostrado en la figura 6.9 del apartado anterior:

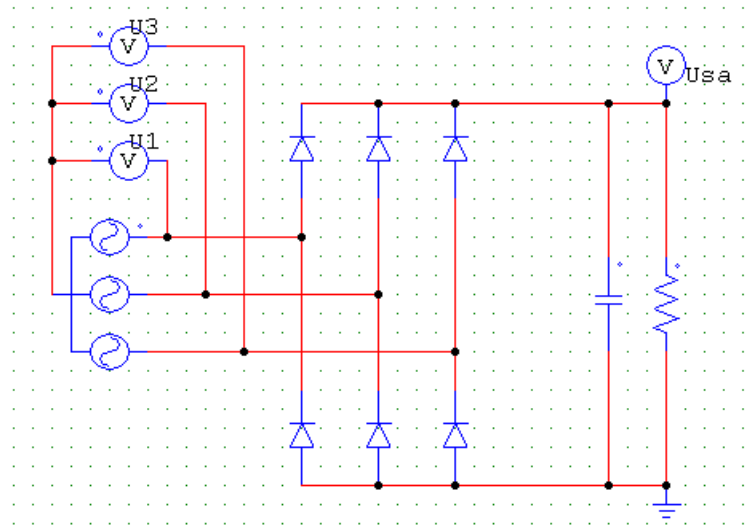


Fig. 6.10: Puente rectificador trifásico de diodos

Se ha conectado un condensador en paralelo a la salida del puente de diodos para filtrar la tensión de salida, y una resistencia que representa la carga conectada al rectificador. En realidad, a la salida lo que se conectará es la batería, que incluirá el condensador aquí mostrado a su entrada.

PSIM ofrece también la opción de emplear un elemento prediseñado, equivalente a un rectificador trifásico de diodos, como el que se muestra en la figura 6.11:

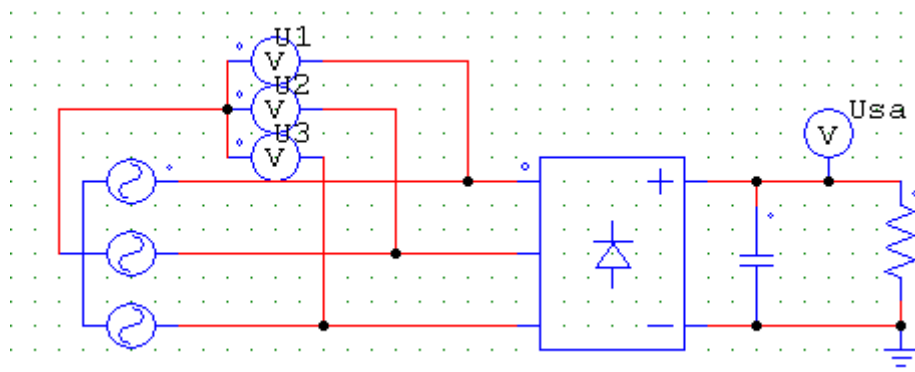


Fig. 6.11: Puente de trifásico de diodos prediseñado como un único componente de PSIM

El puente de diodos prediseñado de PSIM no elimina el rizado de la tensión, por lo que no comprende ningún condensador a su salida: es sólo una representación equivalente del puente de 6 diodos de la figura 4.9. Por ello, los circuitos de las figuras 6.9 y 6.10 son a efectos prácticos exactamente iguales.

Debido a su mayor sencillez se empleará el puente prediseñado, ya que supone sustituir los 6 diodos y los conductores que los unen por un único elemento.

Para comprobar el correcto funcionamiento del modelo, se ha realizado una simulación inicial sin añadir ningún condensador de filtrado de tensión a la salida del circuito.

Se han introducido los siguientes valores de tensión a la entrada: 90V de valor máximo y frecuencia de 50Hz (periodo de 20ms).

Se ha realizado una simulación de 50ms de duración, en la cual se han tomado datos cada 100μs.

De la representación inferior puede deducirse que la onda de tensión de salida obtenida posee un valor medio ligeramente inferior a 150V.

Se observa también que en cada tramo de 10ms se repiten 3 ciclos de onda, por lo que el periodo de la onda de salida es de aproximadamente 3ms.

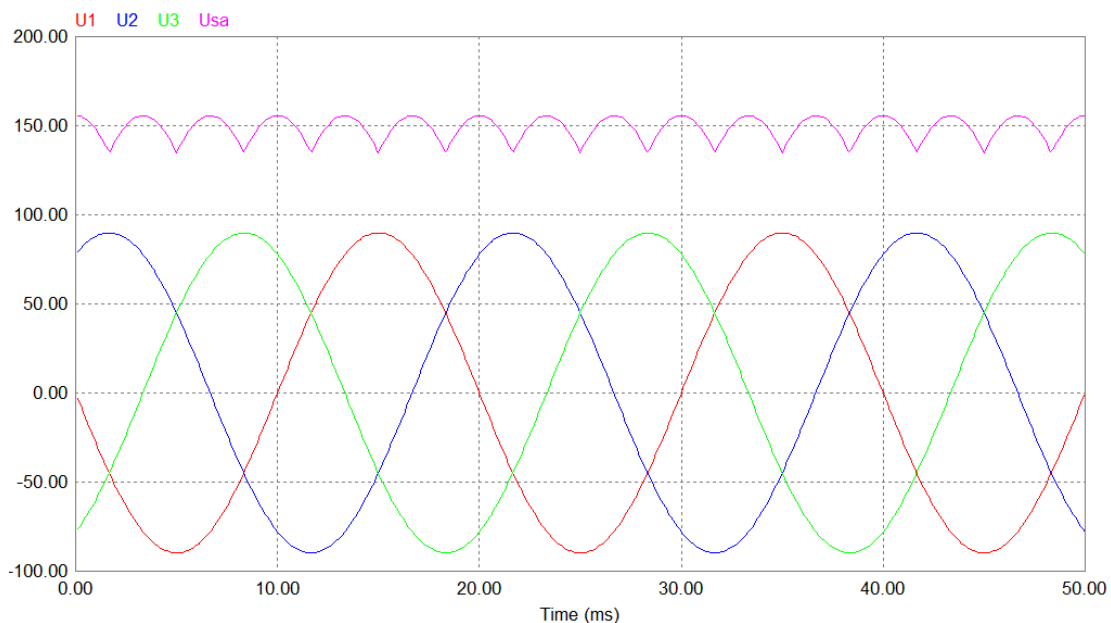


Fig. 6.12: Resultados de PSIM para una tensión de entrada máxima de 90V por fase

Se puede comprobar fácilmente que ese valor medio ligeramente inferior a 150V coincide con el resultado que se obtiene matemáticamente a partir de la ecuación 4.2:

$$U_{sa} = \frac{3 \cdot \sqrt{6}}{\pi} \cdot U_{ent} = \frac{3 \cdot \sqrt{6}}{\pi} \cdot \frac{U_{MAX}}{\sqrt{2}} = \frac{3 \cdot \sqrt{6}}{\pi} \cdot \frac{90}{\sqrt{2}} = 148,85V$$

El periodo debe ser 6 veces más pequeño que el de la entrada, lo cual como se puede comprobar también es cierto:

$$\frac{20ms}{6} = 3,33ms$$

7- COMPONENTES DEL SISTEMA: BATERÍA

7.1- DESCRIPCIÓN DE LA BATERÍA

La batería empleada en este proyecto es una batería convencional de coche. Es por tanto una batería de plomo-ácido que posee 6 celdas, las cuales aportan 2V cada una, luego la tensión de salida son 12V. Posee una capacidad de 45Ah.

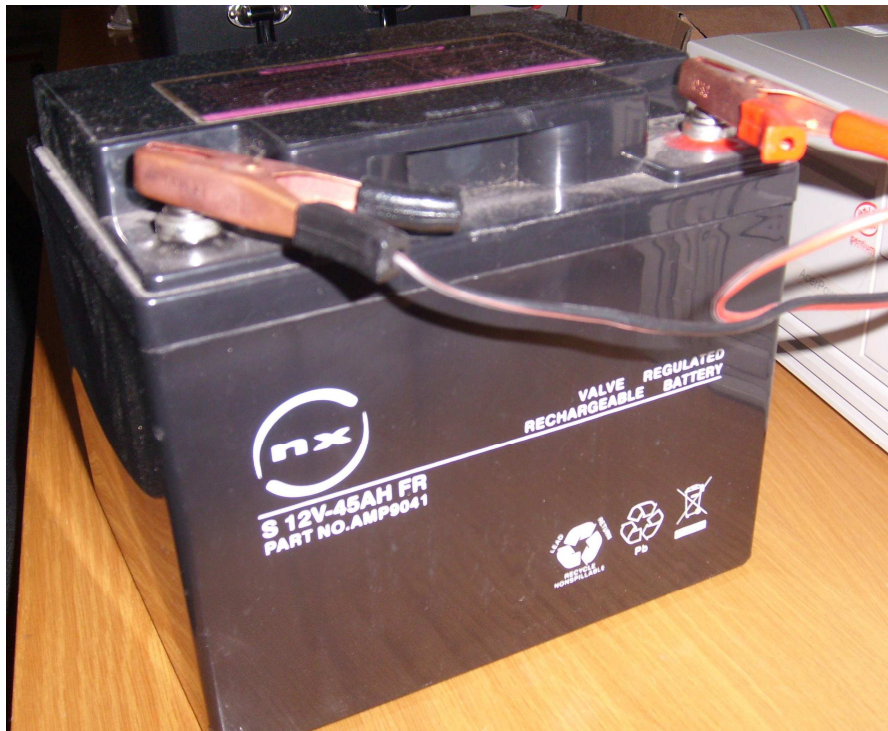


Fig. 7.1: Imagen de la batería

7.2- FUNCIONAMIENTO Y ECUACIONES DE LA BATERÍA

7.2.1- PROCESOS QUÍMICOS EN BATERÍAS DE PLOMO-ÁCIDO

Las baterías de plomo-ácido están formadas por un depósito de ácido sulfúrico que posee en su interior una serie de placas de plomo colocadas en posiciones alternas. Para evitar la combadura de las placas positivas, se añade una placa negativa adicional. Generalmente, en su fabricación las placas positivas están recubiertas de dióxido de plomo PbO_2 , mientras que las negativas están formadas por plomo esponjoso.

Según el número de placas, la corriente suministrada (y con ello la capacidad de la batería) será mayor o menor. Bajo las placas se suele dejar un espacio libre para que se depositen ahí eventuales desprendimientos de los materiales que las forman. Para que no haya contacto eléctrico directo entre placas positivas y negativas, se utilizan separadores aislantes que además deben ser resistentes al ácido y permitir la libre circulación del electrolito.

Cuando la batería está descargada, el plomo se encuentra en forma de sulfato de plomo $PbSO_4$ incrustado en una matriz de plomo metálico Pb . El electrolito es una disolución de ácido sulfúrico cuya densidad es de $1,28 \pm 0.010$ g/ml en carga plena, y desciende a 1,1 g/ml cuando la batería está descargada.

Durante el proceso de carga el sulfato de plomo $PbSO_4$ es reducido a plomo metálico en el polo negativo. En el ánodo se forma óxido de plomo PbO_2 .

Durante la descarga se invierten los procesos de la carga: el óxido de plomo PbO_2 es reducido y el plomo metálico es oxidado, dando ambos procesos como resultado sulfato de plomo $PbSO_4$. Los electrones intercambiados se aprovechan en forma de corriente eléctrica por un circuito externo. Las reacciones químicas ocurridas en la descarga son las siguientes:



Al descargarse la batería se reduce la concentración de ácido sulfúrico debido a la creación de sulfato de plomo, de manera que aumenta la cantidad de agua liberada. Debido a que el ácido sulfúrico concentrado tiene una densidad superior a la del ácido sulfúrico diluido, la densidad del ácido se emplea como indicador del estado de carga de la batería.

Para reducir todo lo posible la liberación de gas hidrógeno durante la reacción con el ácido sulfúrico, se añaden a los electrodos pequeñas cantidades de plata. La liberación de hidrógeno provocaría la degradación del electrodo, facilitando que se desprendieran partes del mismo, lo cual produciría alteraciones irreversibles que acortarían la vida del acumulador.

Si se deja caer la tensión de cada celda por debajo de 1,8V se formarán cristales de sulfato de plomo que no podrán completar las reacciones químicas.

7.2.2- CARGA MÁXIMA Q_{max}

La carga de la batería depende de la corriente y el tiempo según se expresa en la ecuación 7.3:

$$Q_{med} = \int_0^t I_{bat} \cdot dt \quad (7.3)$$

La tensión a plena carga es habitualmente 13,8V.

La tensión de corte de la batería es aquella tensión límite con la cual se considera terminada la descarga. Realizar una descarga demasiado profunda provocará que la tensión descienda por debajo de la tensión de corte, lo cual empeorará la reversibilidad de las reacciones químicas descritas en el apartado anterior reduciendo drásticamente la vida útil de la batería.

Para baterías convencionales como la empleada en este proyecto, la tensión de corte es de 10V.

Si se carga plenamente la batería y después se descarga hasta el valor de la tensión de corte, se habrá utilizado toda la carga disponible. A ese valor de carga se le llama carga máxima o Q_{max} :

$$Q_{max} = \int_{U_{bat}=U_{max}}^{U_{bat}=10V} I_{bat} \cdot dt \quad (7.4)$$

7.2.3- ESTADO DE CARGA SOC

La expresión del estado de carga de la batería SOC se obtiene según la ecuación 7.5:

$$SOC = 1 + \frac{Q_{med}}{Q_{max}} \quad (7.5)$$

Cuando la batería se está descargando el signo de la corriente I_{bat} es negativo. Por ello, la carga medida Q_{med} es durante la descarga un valor decreciente, y el estado de carga SOC igualmente disminuye.

Cuando la batería se está cargando el signo de la corriente I_{bat} es positivo, de modo que la carga medida Q_{med} y el estado de carga SOC son crecientes.

La carga medida Q_{med} es un valor negativo cuyo límite inferior teórico es $-Q_{max}$ ($SOC = 0$) y cuyo límite superior es 0 ($SOC = 1$). En la práctica no se permitirá que el estado de carga sea inferior a 0,8 para no deteriorar la batería realizando descargas excesivamente profundas.

7.2.4- TENSIÓN DE CIRCUITO ABIERTO U_{OC}

Si la batería se va descargando de forma interrumpida (es decir, se conecta y se desconecta una carga repetidas veces), se hallará que tras cada una de las veces en que la carga es desconectada, la tensión en bornes de la batería aumenta ligeramente. Supóngase que tras cargar plenamente la batería, ésta se conecta a una carga durante 15 minutos y se desconecta de la misma durante 30 minutos. El proceso de conexión y desconexión se vuelve a repetir varias veces hasta alcanzar la tensión de corte. La tensión obtenida a lo largo del ensayo evolucionaría en el tiempo de la forma mostrada en la figura 7.2:

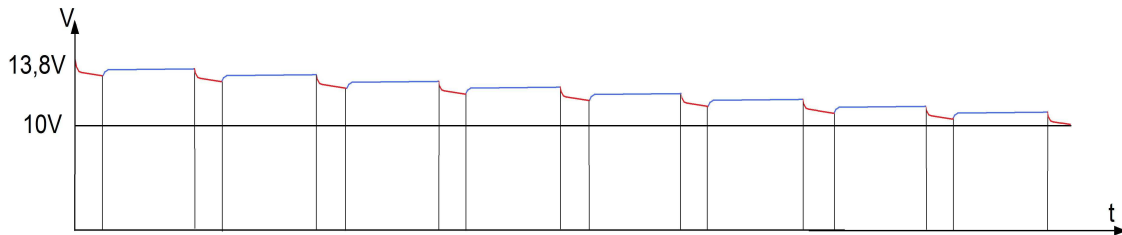


Fig. 7.2: evolución de la tensión con descarga interrumpida de la batería

Los tramos de 15 minutos durante los cuales la carga está conectada son mostrados en rojo. Los tramos de 30 minutos con carga desconectada, en azul. Como se puede apreciar, la tensión se recupera ligeramente durante los tramos azules en los que la carga está desconectada, de manera que la tensión al final de esos tramos es algo mayor que al principio de los mismos. El valor de la tensión al final de cada uno de esos tramos de 30 minutos de desconexión sería la tensión en circuito abierto U_{OC} , una vez que la batería se ha estabilizado tras la fase anterior de descarga de 15 minutos. La tensión de circuito abierto U_{OC} depende del estado de carga de la batería SOC. Esta dependencia puede considerarse lineal:

$$U_{OC} = f(SOC) = A \cdot SOC + B \quad (7.6)$$

7.2.5- CAPACIDAD EQUIVALENTE DE LA BATERÍA C_{bat}

El comportamiento de la batería en los transitorios (especialmente con cambio súbitos de corriente de carga o descarga) se asemeja mucho al de un condensador. Por ello, este comportamiento se suele representar mediante un condensador en paralelo C_{bat} al resto del modelo de la batería.

7.2.6- RESISTENCIA DE DESCARGA R_d

La resistencia de descarga se halla a partir de la ecuación 7.7:

$$R_d = \frac{U_{bat} - U_{OC}}{I_{bat}} \quad (7.7)$$

Donde U_{OC} es la tensión de circuito abierto al final de cada uno de los tramos de 30 minutos, U_{bat} es la tensión en descarga al final de cada uno de los tramos

de 5 minutos e I_{bat} es la corriente en ese mismo instante de tiempo. Como la batería se está descargando el signo de I_{bat} es negativo.

7.2.7- RESISTENCIA DE CARGA R_c

Si en lugar de conectar la batería a una carga se conecta a una fuente de tensión, se puede hacer un ensayo análogo al descrito en el apartado anterior (conexión durante 5 minutos y reposo durante 30 minutos). Sin embargo, en este caso durante los 5 minutos de conexión la batería en lugar de descargarse, se estaría cargando.

Se puede hallar la resistencia de carga mediante la misma ecuación con la que se obtiene la de descarga (7.7). La diferencia consistirá en que el signo de I_{bat} será ahora positivo, debido a que la batería se está cargando.

$$R_c = \frac{U_{bat} - U_{OC}}{I_{bat}} \quad (7.8)$$

Donde de nuevo U_{OC} es la tensión de circuito abierto al final de cada uno de los tramos de 30 minutos, U_{bat} es la tensión en carga al final de cada uno de los tramos de 5 minutos e I_{bat} es la corriente en ese mismo instante de tiempo.

7.2.8- RESISTENCIA DE LA BATERÍA R_{bat} EN FUNCIÓN DE SOC

Tanto la resistencia de carga como la de descarga dependen de U_{OC} , que como se explica en la ecuación 7.8 es una función lineal del estado de carga SOC. Las resistencias de carga y descarga se pueden aproximar también a una función lineal dependiente del estado de carga. La relación entre R_d y SOC es muy similar a la relación entre R_c y SOC, por lo que a efectos prácticos se pueden aproximar la resistencia de carga y descarga en función del estado de carga SOC como una sola función. Gracias a esto, sólo será necesario realizar uno de los dos ensayos de conexión-desconexión mencionados (o bien el de carga, o bien el de descarga) para obtener el valor de la resistencia de la batería en función de SOC. Para simplificar, a partir de este punto se considerará a ambas resistencias R_d y R_c como la misma variable, la cuál se representará siempre como R_{bat} .

$$R_d \approx R_c = R_{bat} = f(SOC) = C \cdot SOC + D \quad (7.9)$$

7.2.9- TENSIÓN DE LA BATERÍA U_{bat}

De las ecuaciones 7.7 y 7.8 se obtiene la tensión de la batería U_{bat} :

$$U_{bat} = U_{OC} + R_{bat} \cdot I_{bat} \quad (7.10)$$

Donde el producto $R_{bat} \times I_{bat}$ será una caída de tensión durante las descargas ($I_{bat} < 0$) y una subida de tensión durante la carga ($I_{bat} > 0$).

7.3- MODELO DE LA BATERÍA

La batería se puede representar mediante una fuente de tensión variable que suministra una tensión U_{bat} entre los bornes positivo y negativo:

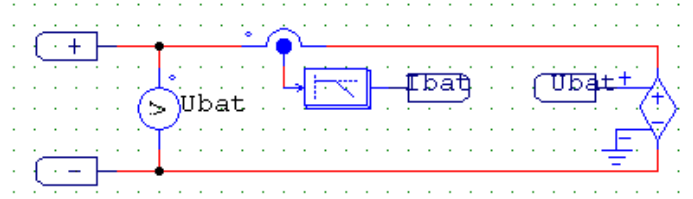


Fig. 7.3: Batería representada como una fuente de tensión variable de tensión U_{bat}

En la ecuación 7.10 se ha visto que la tensión U_{bat} depende de la tensión de circuito abierto U_{OC} y del producto entre la resistencia de la batería R_{bat} y la corriente I_{bat} :

$$U_{bat} = U_{OC} + R_{bat} \cdot I_{bat}$$

A su vez, se ha comprobado en la ecuación 7.6 que la relación de U_{OC} con respecto del estado de carga SOC se puede aproximar a una relación lineal, relación que se puede obtener mediante la realización de ensayos:

$$U_{oc} = f(SOC) = A \cdot SOC + B$$

Según la ecuación 7.9, lo mismo ocurre para la relación entre R_{bat} y SOC:

$$R_d \approx R_c = R_{bat} = f(SOC) = C \cdot SOC + D$$

De todo lo anterior se deduce que la tensión U_{bat} dependerá la corriente I_{bat} y del estado de carga SOC de la siguiente manera:

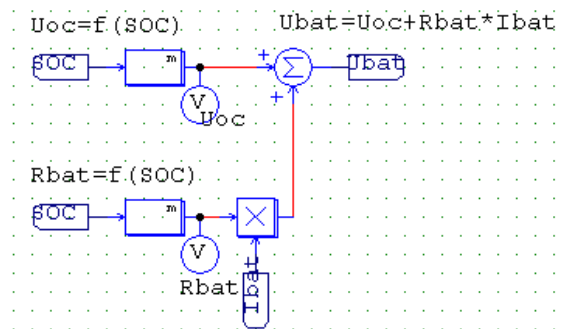


Fig. 7.4: Tensión U_{bat} en función de la corriente I_{bat} y del estado de carga SOC

En la ecuación 7.5 se ha visto como el estado de carga SOC se halla en función de la carga máxima Q_{max} (cuyo valor es constante y se calcula de forma experimental mediante la ecuación 7.4) y la carga medida Q_{med} :

$$SOC = 1 + \frac{Q_{med}}{Q_{max}}$$

A su vez, la carga medida Q_{med} depende de la corriente en la batería tal y como se ha mostrado en la ecuación 7.3:

$$Q_{med} = \int_0^t I_{bat} \cdot dt$$

Dicha ecuación se puede representar en PSIM como:

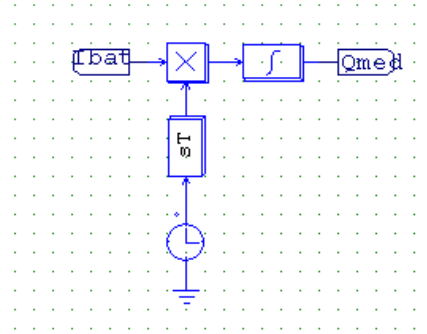


Fig. 7.5: Carga medida de la batería Q_{med} a partir de la corriente I_{bat} y el tiempo

Por lo tanto, la dependencia entre el estado de carga SOC y la corriente en la batería I_{bat} que de la siguiente manera:

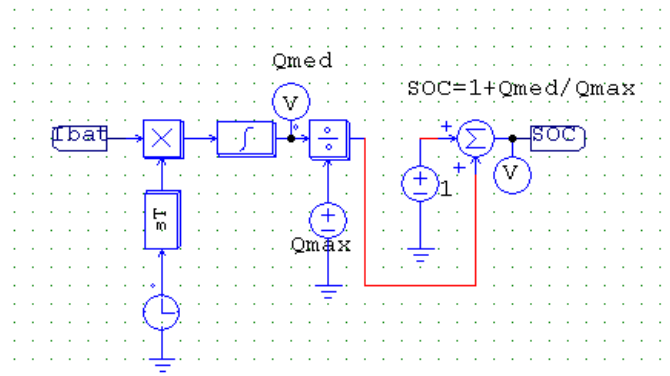


Fig. 7.6: Estado de carga SOC en función de la corriente I_{bat} y del tiempo

Puesto que el estado de carga SOC debe tener un valor comprendido entre 0 y 1, la carga medida Q_{med} deberá estar comprendida siempre en el siguiente rango de valores:

$$SOC = 1 + \frac{Q_{med}}{Q_{max}} \rightarrow \begin{cases} SOC = 1 \rightarrow Q_{med} = (1-1) \cdot Q_{max} = 0 \\ SOC = 0 \rightarrow Q_{med} = (0-1) \cdot Q_{max} = -Q_{max} \end{cases}$$

Es decir, para comenzar a cargar la batería con estado de carga inicial $SOC=0$ habrá que introducir en el modelo un valor inicial de $Q_{med} = -Q_{max}$. Esto puede hacerse en la integral de la figura 7.6 (variable denominada *Initial Output Value*). Pero como se ha dicho anteriormente, no es recomendable descargar totalmente la batería, pues se reducirá drásticamente su vida útil. También es posible introducir un valor inicial de estado de carga SOC mayor que 0. Para ello es necesario calcular el valor de Q_{med} relativo a dicho estado de carga:

$$Q_{med} = (SOC - 1) \cdot Q_{max}$$

Puesto que I_{bat} se puede obtener del circuito inicial de la figura 7.3, se ha conseguido cerrar el modelo, y ya podría funcionar. Si se conectara la salida del rectificador a los bornes de la batería, y el generador estuviera funcionando, se produciría una corriente I_{bat} que iría poco a poco aumentando el estado de carga SOC.

Pero si se deja el modelo tal y como está, cuando el estado de carga alcance el valor máximo (1), la corriente seguirá entrando en el sistema y SOC aumentará por encima del máximo, lo cual no tiene sentido. Para evitarlo se debe introducir un elemento que anule la corriente I_{bat} cuando el estado de carga alcance el valor máximo:

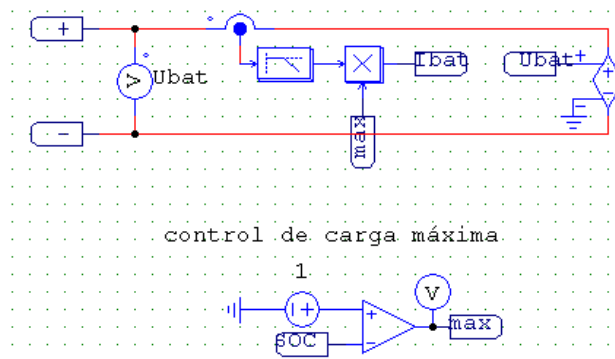


Fig. 7.7: Estado de carga máximo limitado a 1 mediante la anulación de la corriente

Implementando el control de carga máxima mostrado en la figura 7.7 se obtiene la limitación deseada: cuando el estado de carga SOC posea un valor inferior a 1 la variable de control max valdrá 1, y la corriente I_{bat} permanecerá inalterada. De esta manera la batería podrá continuar cargándose o descargándose, en función del signo de I_{bat} . Pero cuando el estado de carga alcance el valor máximo (1), la variable max pasará a tener un valor de 0. Puesto que la corriente está siendo multiplicada por esta variable, I_{bat} se anulará y el estado de carga permanecerá constante (nótese que en realidad la variable max no se anula hasta que el estado de carga rebasa ligeramente el valor de 1, por lo que realmente cuando el estado de carga llega al máximo la variable max oscila rápidamente entre 0 y 1).

Sin en algún momento se produjera una corriente I_{bat} en sentido saliente de la batería (negativo), el estado de carga SOC dejaría de rebasar el valor de 1. Al ocurrir esto, la variable max recuperaría de nuevo el valor 1, y la corriente en la batería dejaría de anularse. Debido al signo negativo de la corriente, Q_{med} comenzaría a disminuir, y con ella también SOC. Nótese que realmente esto no ocurrirá jamás en nuestro sistema, ya que el rectificador nunca va a demandar corriente eléctrica a la batería. En todo caso, sólo suministrará corriente a la batería cuando se produzca viento suficiente para ello, y no suministrará nada cuando no se den esas condiciones. Sin embargo, el modelo de la batería serviría también para una situación en la que la batería se esté descargando (aunque en ese caso habría que implementar un limitador de carga mínima similar al limitador de carga máxima que se ha explicado).

Por último, como se ha explicado en el apartado de ecuaciones el comportamiento transitorio de la batería (por ejemplo cuando se producen cambios súbitos de corriente de carga o descarga) se asemeja bastante al de un condensador, por lo que se suele hablar a menudo de la capacitancia interna equivalente de la batería. Dicha capacitancia interna C_{bat} puede representarse como un condensador en paralelo a la fuente de tensión variable que representa la tensión en la batería U_{bat} :

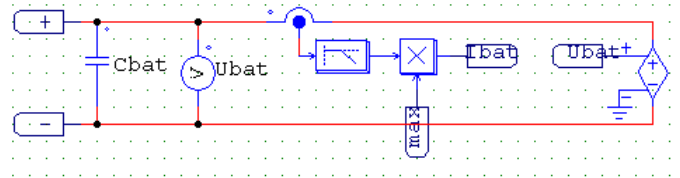


Fig. 7.8: Capacidad equivalente de la batería representada mediante el condensador C_{bat}

Finalmente el modelo completo de la batería queda de la siguiente manera:

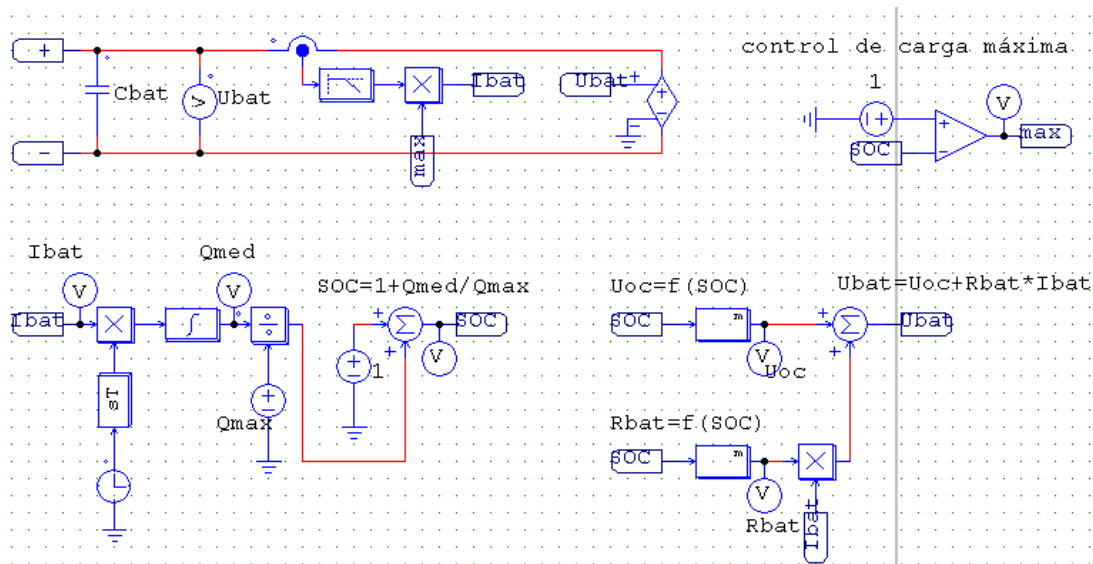


Fig. 7.9: Modelo completo de la batería

7.4- CARACTERIZACIÓN DE LA BATERÍA

7.4.1- ENSAYO DE DESCARGA CONTINUA

Objetivo:

El objetivo de este ensayo será obtener el valor de carga máxima Q_{max} , que como se ha explicado en el apartado anterior se obtiene descargando la batería desde su nivel de carga máxima hasta obtener la tensión de corte. A partir de la ecuación 7.4 la carga máxima Q_{max} se calcula como:

$$Q_{max} = \int_{U_{bat}=U_{max}}^{U_{bat}=10V} I_{bat} \cdot dt$$

Condiciones del ensayo:

Inicialmente la batería estaba completamente cargada pero llevaba un tiempo sin ser usada, por lo que se realizan varios ciclos de carga y descarga previos al ensayo hasta obtener un funcionamiento lo más cercano posible a las condiciones reales. Tras ello, se vuelve a cargar completamente la batería.

Se emplea un registrador de datos de tipo Yokogawa OR100 para obtener la evolución de la corriente y la tensión en el tiempo. El registrador lleva incorporada una pequeña impresora con la que se imprime en tiempo real el resultado del ensayo. El registrador se considera correctamente calibrado y sus mediciones lo suficientemente precisas.

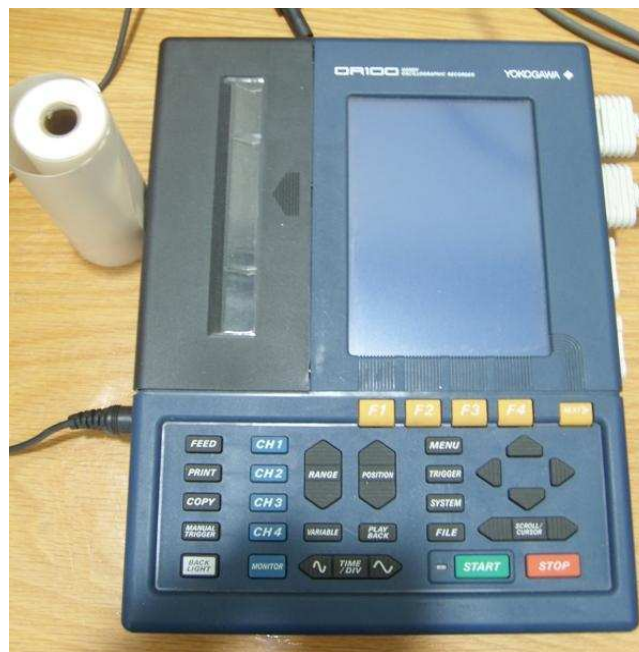


Fig. 7.11: Imagen del registrador de datos Yokogawa OR100

La tensión suministrada por la batería será recogida por el primer canal del registrador. La corriente se obtendrá mediante una resistencia Shunt conectada al borne positivo de la batería y en serie con la carga. La tensión entre los bornes de dicha resistencia será recogida por el segundo canal del registrador.

Para hallar el valor de corriente habrá que dividir el valor de la tensión obtenida en el segundo canal por la resistencia Shunt. El valor de dicha resistencia será igual a la fracción entre la caída de tensión nominal en la misma (0,15V) y su corriente nominal (6A):

$$I_{bat} = \frac{U_{SHUNT}}{R_{SHUNT}} = \frac{U_{SHUNT}}{0,15/6}$$

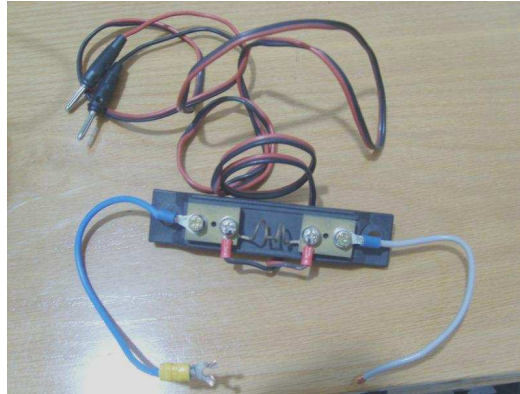


Fig. 7.12: Imagen de la resistencia Shunt empleada

Entre uno los bornes de la resistencia Shunt y el borne negativo de la batería se conecta una carga consistente en dos lámparas de coche de 55W en paralelo:

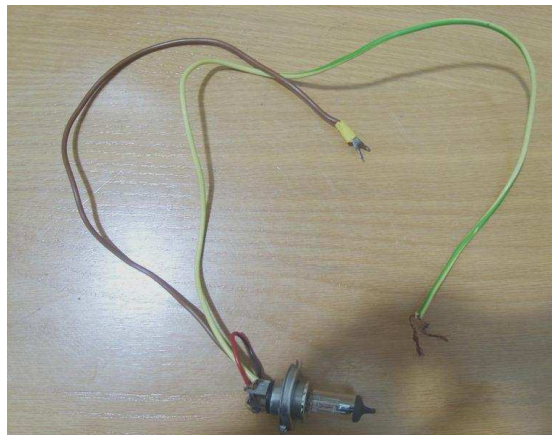


Fig. 7.13: Imagen de la lámpara de coche utilizada

En definitiva, el circuito obtenido para el ensayo es el siguiente:

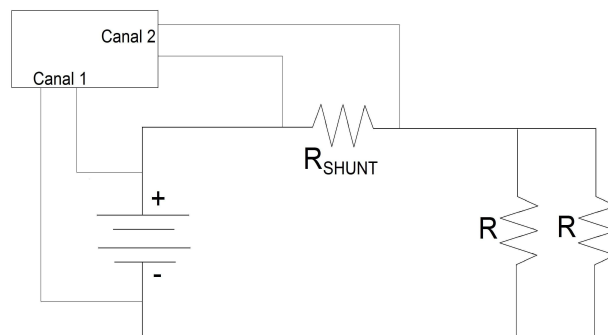


Fig. 7.14: Imagen de la lámpara de coche utilizada

El ensayo acaba cuando la tensión cae por debajo de la tensión de corte (10V).

Resultado:

Cuando han transcurrido 3h y 10min desde el inicio se alcanza la tensión de corte. El registrador Yokogawa OR100 ha impreso en una hoja la evolución de las mediciones realizadas en ambos canales. Los datos obtenidos en dicha hoja han sido transferidos manualmente a una hoja Excel empleando intervalos de tiempo de 6s (los datos completos se muestra en la hoja *Excel adjunta Ensayo de descarga de la batería*). La evolución de la tensión y la corriente en el tiempo son las siguientes:

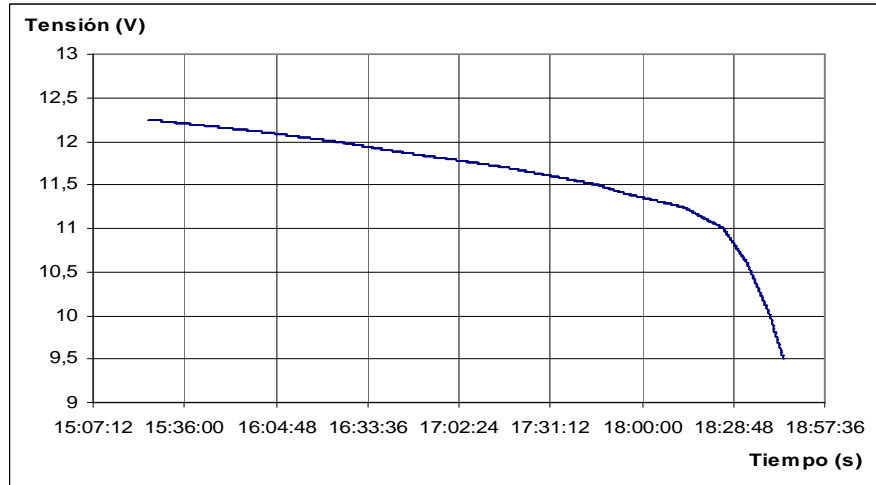


Fig. 7.15: Evolución de la tensión en el tiempo durante el ensayo de descarga continua

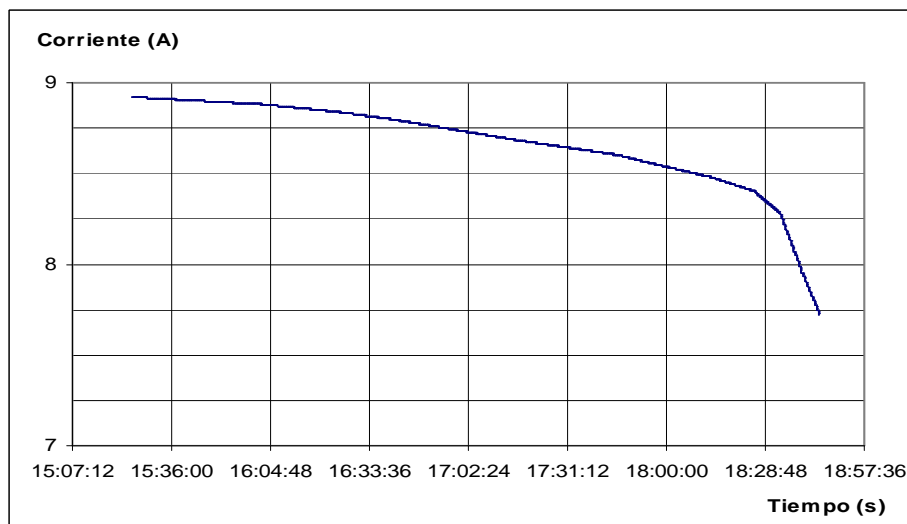


Fig. 7.16: Evolución de la corriente en el tiempo durante el ensayo de descarga continua

7.4.2- CARGA MÁXIMA Q_{max}

Multiplicando esos valores de I_{bat} por el incremento de tiempo (6s) y sumando se obtiene la carga máxima Q_{max} (datos en hoja Excel adjunta *Ensayo de descarga de la batería*):

$$Q_{max} = \int_{U_{bat}=U_{max}}^{U_{bat}=10V} I_{bat} \cdot dt = \sum_{U_{bat}=U_{max}}^{U_{bat}=10V} I_{bat} \cdot \Delta t = 104096,64 A \cdot s$$

7.4.3- ENSAYO DE DESCARGA DISCONTINUA

Objetivo:

El objetivo de este ensayo será obtener las siguientes relaciones:

- Variación del estado de carga SOC en función del tiempo que dura el ensayo.
- Tensión de circuito abierto U_{OC} como función lineal del estado de carga SOC.
- Resistencia de carga/descarga R_d como una función lineal de SOC.

Condiciones del ensayo:

Se vuelve a cargar completamente la batería.

Se emplea de nuevo el registrador de datos Yokogawa OR100, para obtener la evolución de la corriente y la tensión en el tiempo. También se utilizará la resistencia Shunt para la obtención de una tensión que permita el cálculo de la corriente, y dos bombillas a modo de carga. En definitiva, el circuito eléctrico es el mismo que el empleado para el ensayo de descarga continua.

La diferencia con respecto al ensayo anterior radica en que ahora se introducirá un contactor que permitirá abrir y cerrar el circuito, conectando y desconectando la carga de la batería. El contactor estará gobernado por unos temporizadores que forzarán la conexión y desconexión de forma periódica. Un periodo de conexión-desconexión durará en total unos 45 minutos, de los cuales la carga permanecerá conectada durante 15 minutos y desconectada durante los restantes 30 minutos.

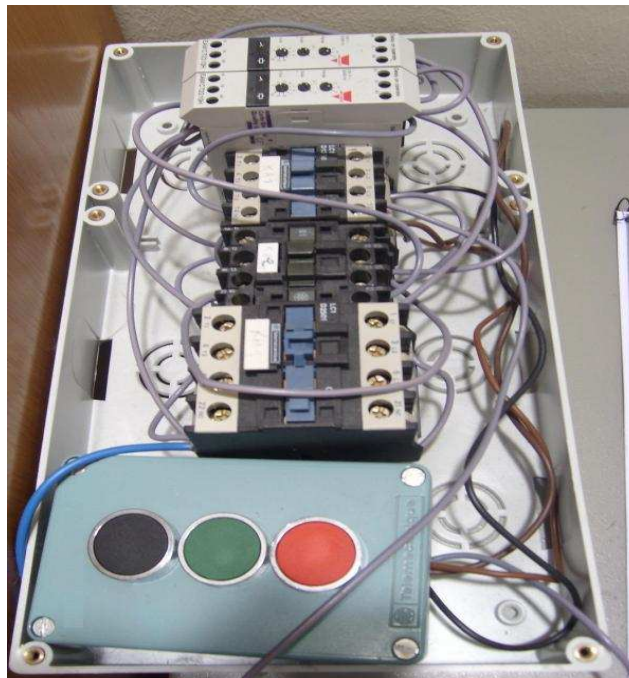


Fig. 7.17: Sistema de temporizadores programado para abrir y cerrar el contactor

Al igual que en el ensayo de descarga continua, el ensayo finalizará cuando la tensión de la batería descienda por debajo de la tensión de corte (10V).

Resultado:

Al igual que en el ensayo anterior, el registrador Yokogawa OR100 ha impreso los datos en una hoja y estos han sido transferidos manualmente a una hoja Excel, esta vez empleando intervalos de 30s (la hoja Excel adjunta *Ensayo de descarga de la batería* contiene los datos completos). Desgraciadamente, el papel de la impresora se ha acabado antes de completar el ensayo y llegar a la tensión de corte (10V), pero aún así los datos obtenidos son válidos para hallar las variables deseadas.

La evolución de la tensión y la corriente en el tiempo ha sido la siguiente:

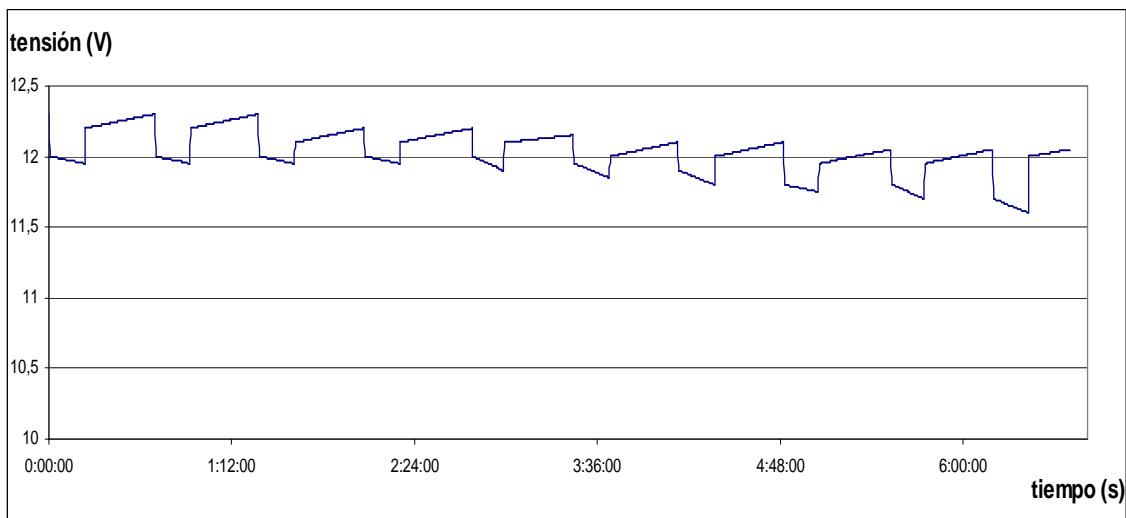


Fig. 7.18: Evolución de la tensión en el tiempo durante el ensayo de descarga discontinua

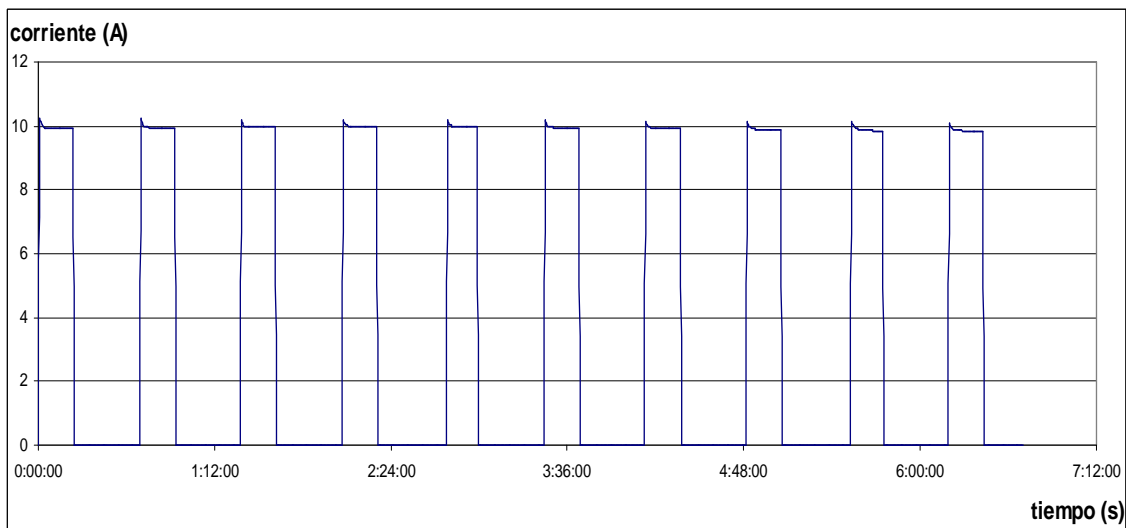


Fig. 7.19: Evolución de la corriente en el tiempo durante el ensayo de descarga discontinua

A partir de los valores corriente y tensión obtenidos a lo largo del ensayo se podrán calcular el estado de carga SOC en función del tiempo, la tensión de circuito abierto U_{OC} en función del estado de carga y la resistencia R_d de descarga en función del estado de carga.

7.4.4- ESTADO DE CARGA SOC

El estado de carga SOC se obtiene a mediante la ecuación 7.5:

$$SOC = 1 + \frac{Q_{med}}{Q_{max}} = 1 + \frac{Q_{med}}{104096,64}$$

Para hallar el valor de la carga medida Q_{med} en cada instante se deberá emplear la ecuación 7.3. Se sustituirá el diferencial de tiempo dt de la ecuación por un incremento de tiempo Δt , lo que permitirá aproximar la integral de dicha ecuación a un sumatorio:

$$Q_{med} = \int_0^t I_{bat} \cdot dt = \sum_0^t I_{bat} \cdot \Delta t$$

Multiplicando cada uno de los valores de corriente anotados en la hoja Excel *Ensayo de descarga de la batería* por el incremento de tiempo (30 segundos) y sumando se calcula la carga medida Q_{med} en cada instante de tiempo. A partir de la misma se halla el estado de carga SOC mediante la expresión 7.5:

$$SOC = 1 + \frac{Q_{med}}{Q_{max}}$$

Introduciendo los datos obtenidos en la expresión 7.5, la evolución del estado de carga SOC en el tiempo es el siguiente:

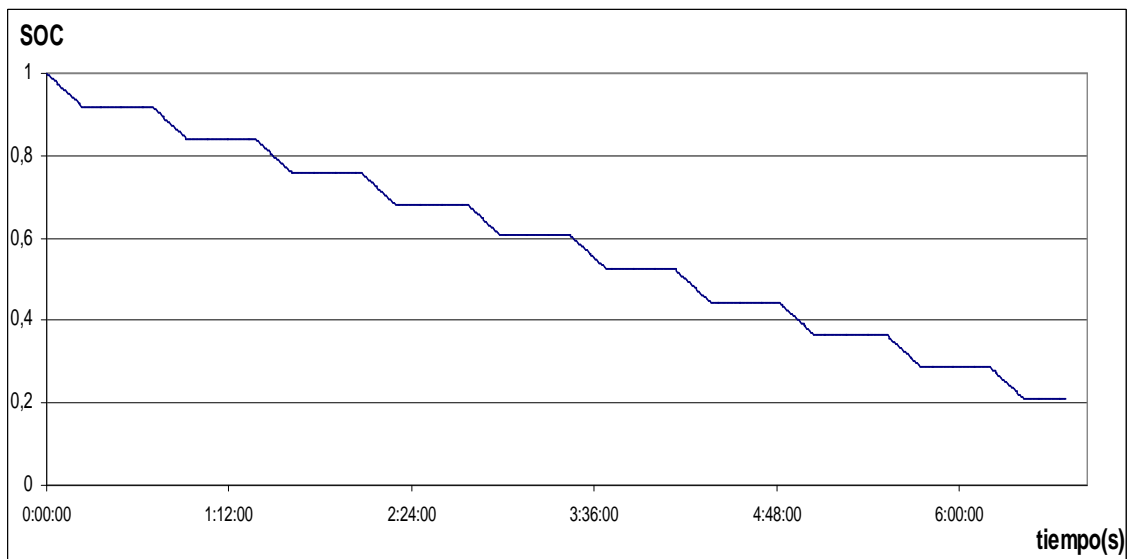


Fig. 7.20: Estado de carga SOC en el tiempo durante el ensayo de descarga discontinua

7.4.5- Tensión de circuito abierto U_{OC} EN FUNCIÓN DE SOC

Se han anotado los valores de tensión obtenidos al final de cada uno de los tramos de desconexión de carga que duran 30 minutos. En la siguiente tabla se muestran dichos valores y el estado de carga en el momento en el que fueron registrados:

U_{oc}	SOC
12,3	1
12,3	0,9198
12,25	0,8395
12,25	0,759
12,2	0,6785
12,15	0,6066
12,1	0,5263
12,1	0,4433
12,05	0,3634
12,05	0,2893
12	0,2097

Fig. 7.21: Tensión de circuito abierto U_{OC} y estado de carga SOC

Se han representado esos valores en una gráfica y se han aproximado los resultados a una recta para hallar una función lineal que refleje la dependencia de U_{OC} con respecto al estado de carga SOC. La función hallada es:

$$U_{oc} = f(SOC) = 0,3741 \cdot SOC + 11,938$$

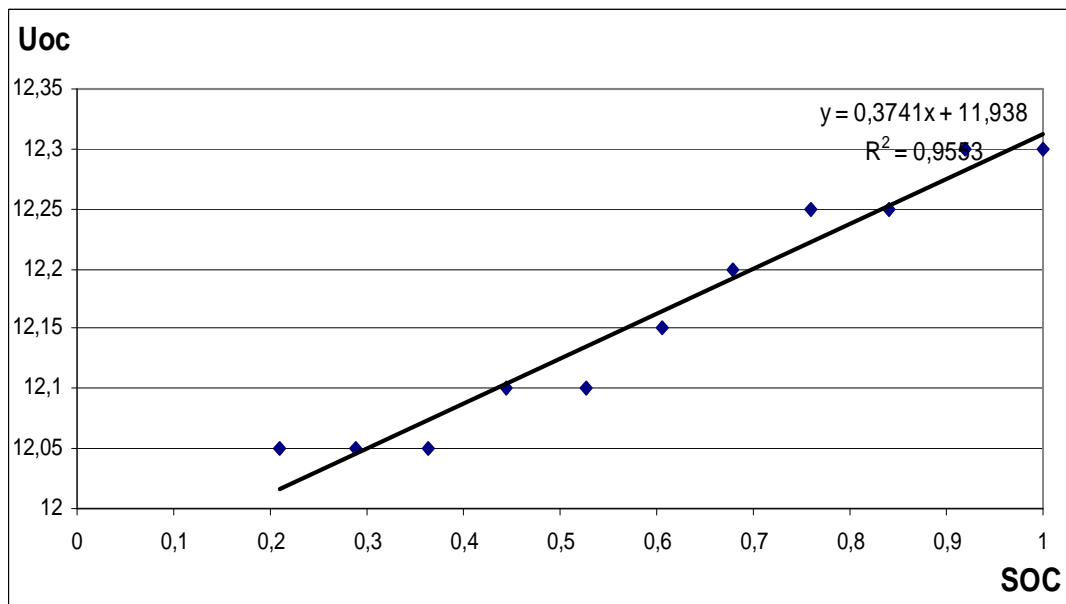


Fig. 7.22: Tensión de circuito abierto U_{OC} en función del estado de carga SOC

7.4.6- RESISTENCIA DE LA BATERÍA R_{bat} EN FUNCIÓN DE SOC

A partir de la ecuación 7.7:

$$R_{bat} = \frac{U_{bat} - U_{OC}}{I_{bat}}$$

Se toman los valores de tensión de circuito abierto U_{OC} al final de cada tramo de 30 minutos de desconexión. Se toman los valores de corriente I_{bat} en la batería y de tensión U_{bat} al final de cada tramo de 15 minutos de conexión. Con ellos se calcula R_d :

Rbat	SOC
0,02520161	0,9198
0,03024194	0,8395
0,03012048	0,759
0,03012048	0,6785
0,03012048	0,6066
0,03024194	0,5263
0,03024194	0,4433
0,0354251	0,3634
0,03556911	0,2893
0,04573171	0,2097

Fig. 7.23: Resistencia de descarga R_{bat} y estado de carga SOC

Tal y como se ha hecho con la tensión, se halla la dependencia lineal entre R_{bat} y SOC:

$$R_{bat} = f(SOC) = -0,0192 \cdot SOC + 0,0431$$

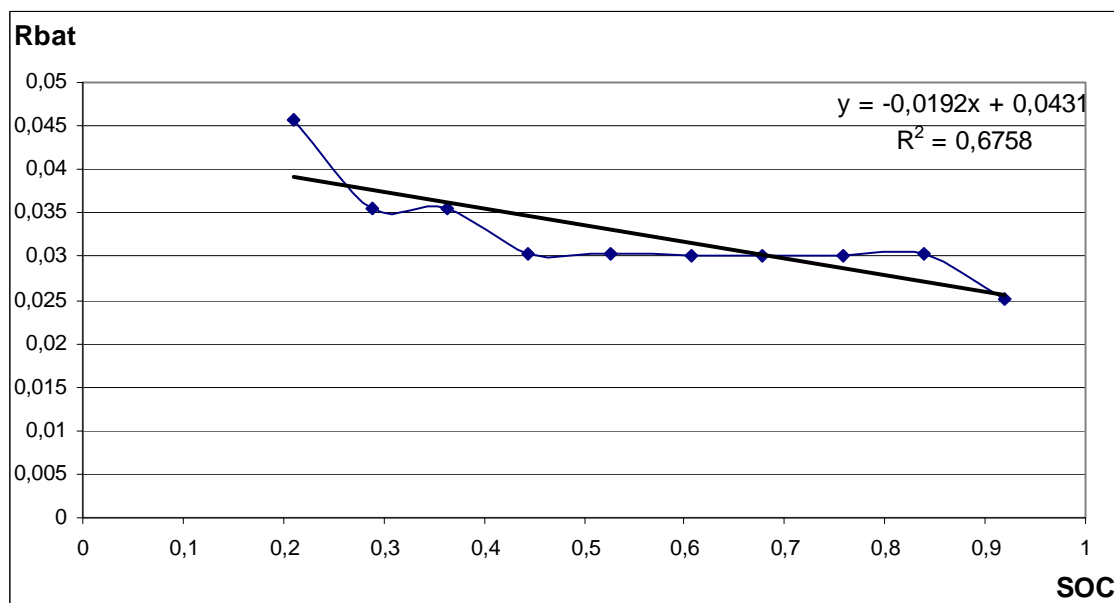


Fig. 7.24: Resistencia de descarga R_{bat} en función del estado de carga SOC

7.4.7- CAPACIDAD INTERNA EQUIVALENTE C_{bat}

El condensador equivalente suele tener un valor elevado (del orden de mF). Inicialmente se pensó en estudiar otras modelizaciones de baterías existentes con características similares a la nuestra, y asignar a C_{bat} el mismo valor empelado en esos casos. Pero existen muchos tipos distintos de baterías, y también se emplean muchos modelos matemáticos diferentes al nuestro para representarlas (por ejemplo con varios condensadores en lugar de uno solo, o con condensadores en serie). Además de esto, al producto entre corriente y tiempo también se la denomina capacidad de la batería, aún siendo esta última una variable que nada tiene que ver con el condensador equivalente que buscamos. Por las razones anteriores no ha sido posible hallar información útil sobre otros casos que puedan servir para obtener un algún valor de C_{bat} .

La velocidad de la respuesta de la batería depende de ese valor de capacidad C_{bat} . Este parámetro es importante cuando se producen transitorios muy rápidos a la entrada de la batería, por ejemplo cuando se le conecta un circuito abierto y en un instante determinado se decide cerrarlo, con lo que se genera una señal de entrada muy brusca (típicamente de varios kHz o incluso MHz) que es muy similar a las entradas de tipo escalón. Sin embargo, la capacidad interna de la batería también suele poseer un valor considerablemente elevado (del orden de mF), debido a lo cual la capacidad de respuesta de la batería frente a los transitorios también es grande. Salvo que se produzcan señales tan rápidas como las antes mencionadas, la respuesta de la batería suele ser casi inmediata.

La señal de entrada en nuestro sistema es la velocidad del viento v , y aunque sí es verdad que v varía de forma más rápida de lo habitual cuando se producen rachas de viento, las variaciones de v se producen a frecuencias mucho más bajas que las anteriormente mencionadas. A esto hay que añadirle el hecho de que debido al momento de inercia de las palas de la turbina, la multiplicadora y el generador, el conjunto del sistema evolucionará de forma más lenta que la velocidad del viento. Debido a esto, se espera que los cambios en la batería se produzcan de manera progresiva, y se prevé que la respuesta de la batería será rápida cualquiera que sea el valor de C_{bat} empleado, por lo que no es necesario calcular este parámetro con demasiada precisión. Para hallar un valor que podamos usar como capacidad equivalente de la batería, se realizarán algunas simulaciones con el modelo del sistema una vez que éste haya sido completado (ver capítulo 9 *Modelo completo*). Se probarán distintos valores típicos de C_{bat} con el objetivo de averiguar si existen diferencias en la respuesta, y si no se aprecian se escogerá cualquiera de ellos como valor equivalente.

8- CONDENSADORES

Como se ha explicado en la introducción, se pretende emplear condensadores para contrarrestar la potencia reactiva inductiva producida por la reactancia síncrona del generador X_S y mejorar la eficiencia de la máquina, con lo que se espera modificar el comportamiento del sistema en su conjunto, y en concreto se pretende acercar el rendimiento de la turbina C_P al valor máximo C_{Pmax} . Sin embargo, no es fácil calcular el tamaño de condensadores necesario para mejorar el rendimiento de la turbina, pues éste no depende sólo del valor de condensadores empleado. Por ello, junto a los condensadores es necesario analizar también otros parámetros para optimizar el sistema completo. En el apartado denominado *Ajuste del sistema* se explicará con más detalle cuáles son esas otras variables que también inciden en dicho rendimiento, y se calculará el valor de condensadores a emplear. En este apartado sólo se explican los efectos producidos por los condensadores.

En cualquier caso, al margen de lo que le ocurra al resto del sistema, para optimizar el rendimiento del generador se debe compensar la potencia reactiva inductiva provocada por la reactancia síncrona. Para ello, el condensador óptimo es aquel que produce la misma cantidad de potencia reactiva que genera la inductancia síncrona, anulándola. El problema reside en que dichas potencias dependen del valor de las reactancias (tanto capacitiva como inductiva), y las reactancias dependen a su vez de la frecuencia, directamente proporcional a la velocidad de giro del generador. Es decir: para cada valor de velocidad de giro se producirá una potencia reactiva inductiva distinta, y el valor de condensador óptimo que contrarresta dicha potencia reactiva será distinto.

La ecuación 8.1 muestra la reactancia inductiva X_S producida por la inductancia síncrona L_S :

$$X_S = 2\pi f L_S \quad (8.1)$$

La ecuación 8.2 muestra la reactancia capacitiva X_C producida por los condensadores de capacidad C :

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} \quad (8.2)$$

Para que la reactancia capacitiva generada con los condensadores anule la reactancia inductiva generada por la inductancia síncrona, se tiene que cumplir la ecuación 8.3:

$$X_S = X_C \rightarrow 2\pi f L_S = \frac{1}{2\pi f C} \rightarrow C = \frac{1}{L_S 4\pi^2 f^2} \quad (8.3)$$

Es decir, el valor de condensador óptimo depende de la inductancia síncrona L_S (cuyo valor es una constante conocida) y de la inversa de la frecuencia al cuadrado. Cuanto mayor sea la velocidad de giro, menor será el condensador que habrá que emplear para compensar la potencia reactiva inductiva.

9- MODELO COMPLETO

El modelo del sistema completo queda de la siguiente manera:

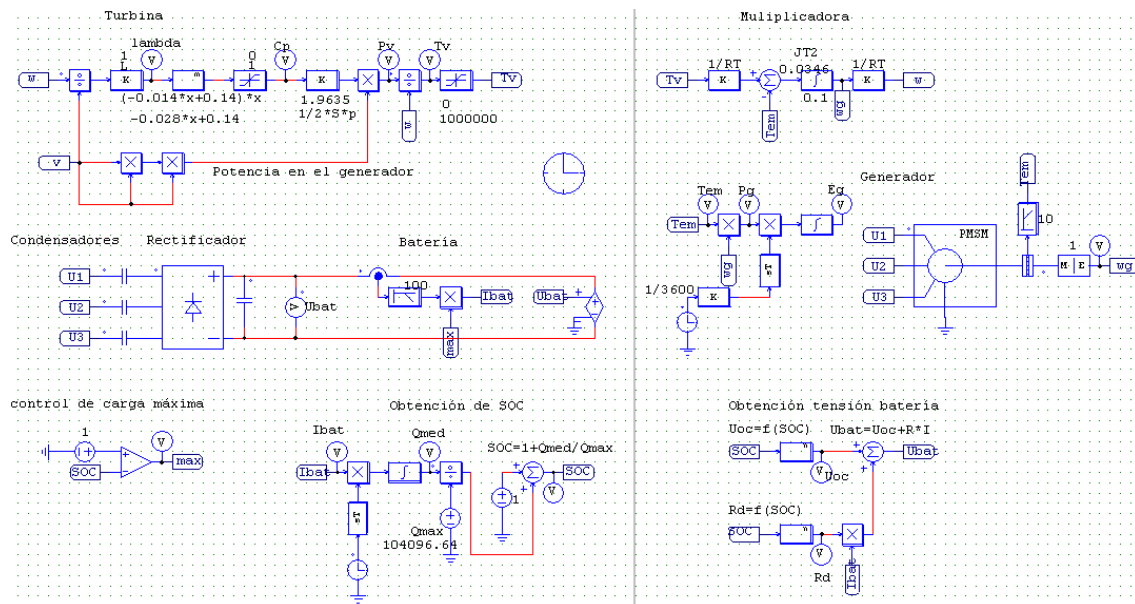


Fig. 9.1: Modelo completo

A la salida del generador se han colocado los condensadores, cuyo valor aún hay que establecer para optimizar el rendimiento. Esto se llevará a cabo en el apartado 10 denominado *Ajuste del sistema*.

9.1- OBTENCIÓN DE C_{bat}

Otro condensador cuyo valor aún hay que establecer (pero que nada tiene que ver con los que se han colocado a la salida del generador) es el correspondiente a la capacidad interna equivalente de la batería C_{bat} . En el apartado de la batería se ha explicado como debido a las características de esta variable lo más probable es que tenga muy poca influencia en el funcionamiento general del sistema. Por ello en lugar de realizar ensayos o cálculos para su obtención, se ha decidido dejar para este momento la caracterización del mismo. Dicha caracterización se llevará a cabo simplemente realizando simulaciones con el modelo completo con diferentes valores típicos de C_{bat} .

Lo más interesante es estudiar el comportamiento de la batería con cambios muy rápidos de las variables de entrada. Pero como ya se ha explicado en el apartado de la batería, aunque nuestra variable de entrada (la velocidad del viento v) cambie bruscamente, el resto del sistema evolucionará de forma más lenta, debido entre otras cosas al momento de inercia de la turbina, la multiplicadora y el generador. Para estudiar el peor de todos los casos posibles, las simulaciones se realizarán suponiendo que se producen señales de velocidad de viento de tipo impulso y escalón.

Los parámetros RT y C aún no han sido calculados (esto se hará estudiando diferentes valores para estos parámetros en el apartado 10 *Ajuste del sistema*), pero necesitamos otorgarles algún valor para poder simular con diferentes valores de C_{bat} . Se ha decidido emplear a modo de ejemplo $RT = 12$ y $C = 100\mu F$, ya que son dos valores bastante centrados en sus respectivos rangos de estudio.

En las siguientes figuras se puede apreciar como se han estudiado algunas situaciones empleando diferentes valores de C_{bat} . Se mostrarán los resultados obtenidos de rendimiento de la turbina C_P , potencia del viento P_v , potencia en el generador P_g y corriente en la batería I_{bat} .

Los resultados obtenidos para una entrada de tipo impulso son los siguientes:

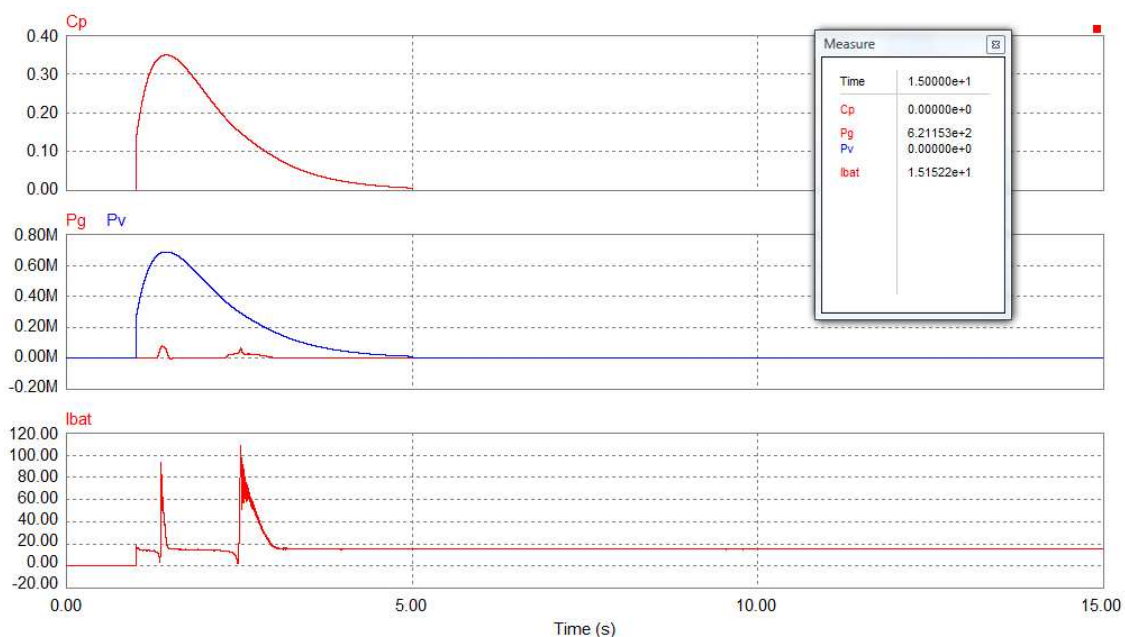


Fig. 9.2: C_P , P_v , P_g e I_{bat} con velocidad v de tipo impulso y $C_{bat} = 10\mu F$

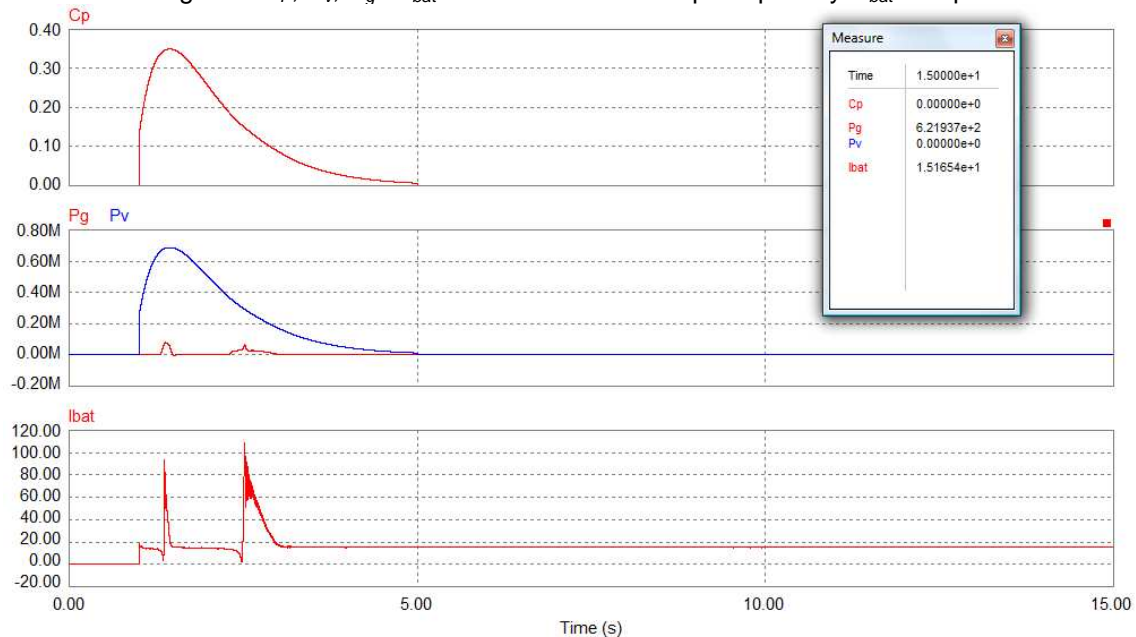
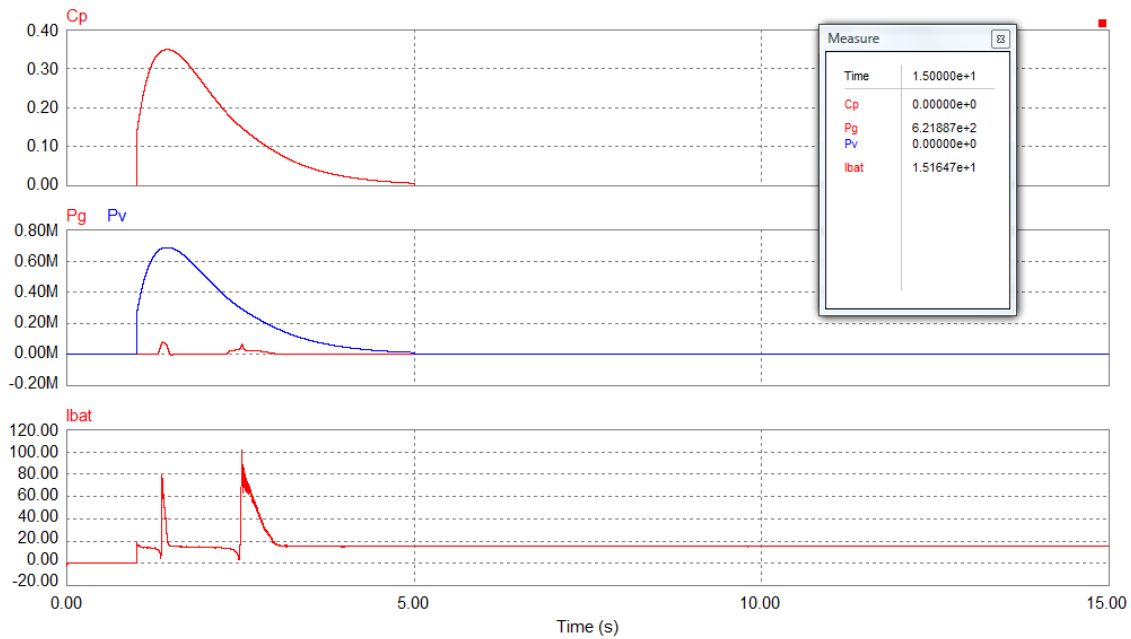
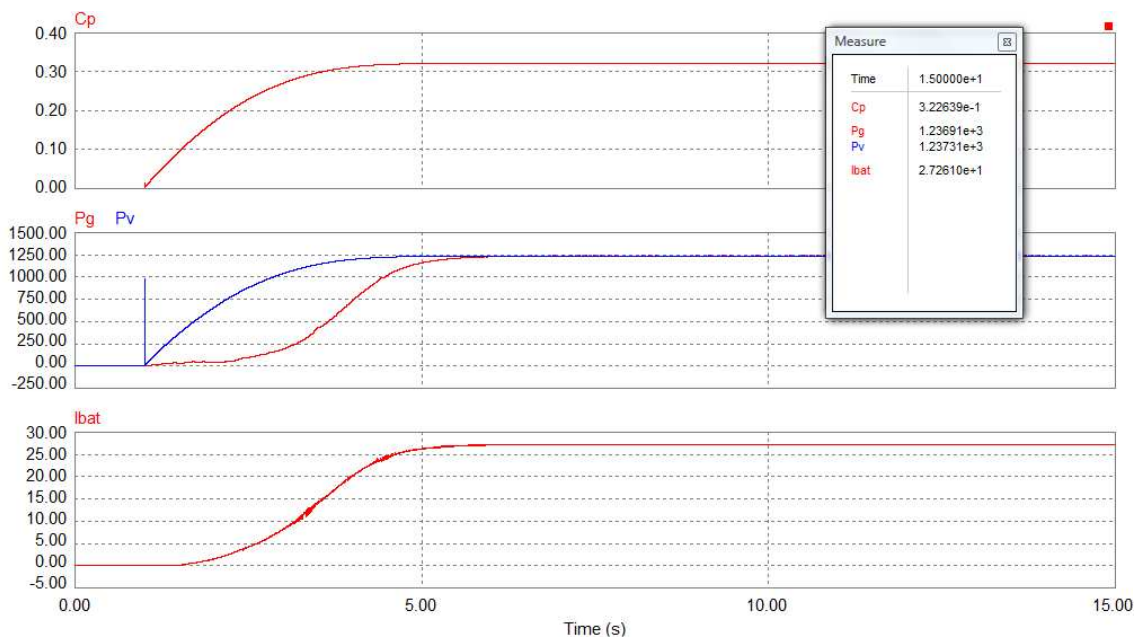


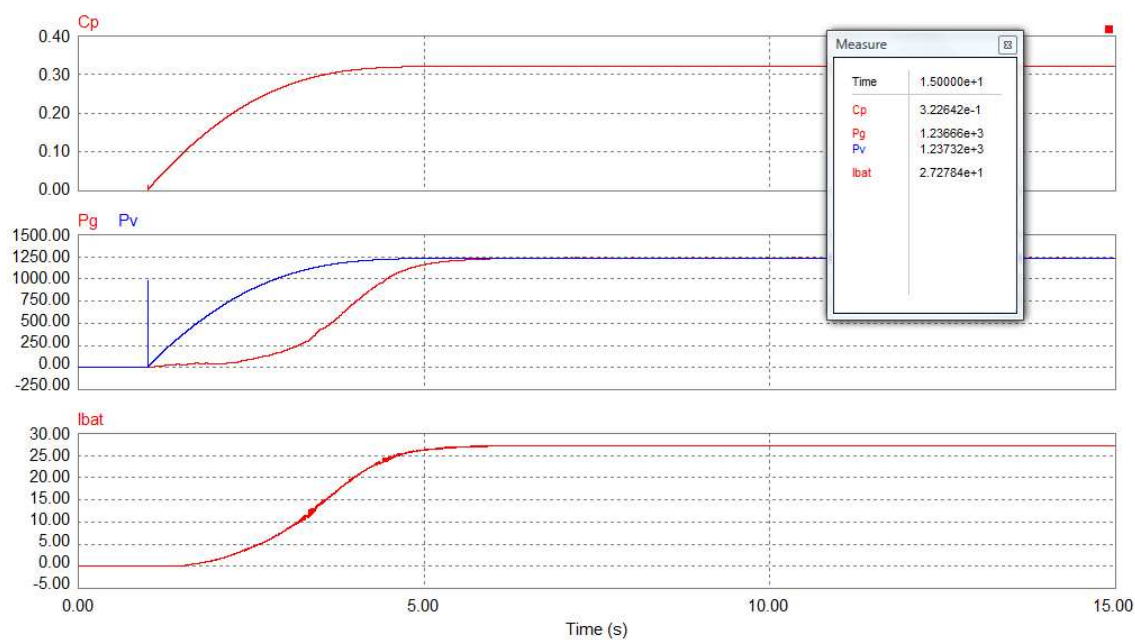
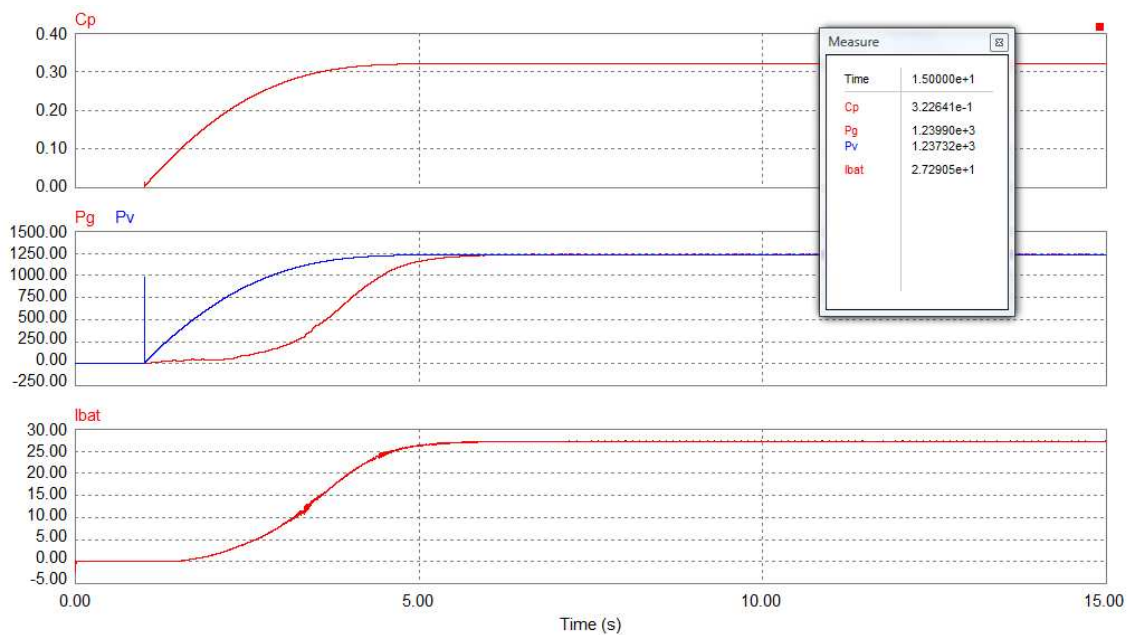
Fig. 9.3: C_P , P_v , P_g e I_{bat} con velocidad v de tipo impulso y $C_{bat} = 1mF$

Fig. 9.4: C_p , P_v , P_g e I_{bat} con velocidad v de tipo impulso y $C_{bat} = 100\text{mF}$

Como puede apreciarse, no hay diferencias entre los resultados obtenidos con valores de C_{bat} tan dispares como $10\mu\text{F}$, 1mF y 100mF . También se puede observar que la potencia del viento P_v , cambia de forma inmediata con el aumento de la velocidad del viento, pero que la potencia en el generador P_g evoluciona de forma mucho más lenta y tarda más en modificar su valor, tal y como se sospechaba. Lo mismo ocurre con la potencia en el generador ocurre también con corriente en la batería I_{bat} .

Se ha simulado también introduciendo señales de tipo escalón, donde el sistema pasará de tener $v = 0$ a tener la velocidad máxima al que la turbina es capaz de trabajar ($12,5\text{m/s}$):

Fig. 9.5: C_p , P_v , P_g e I_{bat} con velocidad v de tipo escalón y $C_{bat} = 10\mu\text{F}$

Fig. 9.6: C_p , P_v , P_g e I_{bat} con velocidad v de tipo escalón y $C_{bat} = 1\text{mF}$ Fig. 9.7: C_p , P_v , P_g e I_{bat} con velocidad v de tipo escalón y $C_{bat} = 100\text{mF}$

Tampoco con entradas de tipo escalón se aprecia ninguna diferencia si se modifica el valor de C_{bat} , por lo que en los análisis posteriores a realizar se empleará un valor de capacidad equivalente de 1mF .

10- AJUSTE DEL SISTEMA

10.1- VARIABLES A CONSIDERAR

10.1.1- VARIABLES QUE AFECTAN AL RENDIMIENTO DEL SISTEMA

Se han establecido hasta ahora los valores de muchos parámetros, que permanecerán constantes para cualquier rango de funcionamiento. Pero hay algunas variables aún sin definir y otras que no son constantes y varían en función del punto de funcionamiento en el que se encuentre el sistema. Algunas de esas variables poseen complejas relaciones entre ellas y sus valores inciden enormemente en el valor obtenido de rendimiento en la turbina C_P , por lo que para poder ajustar el sistema y mejorar su rendimiento será necesario considerarlas conjuntamente. Esas variables son:

- Velocidad del viento v
- Relación de transmisión de la multiplicadora RT
- Punto de trabajo de la batería, determinado por el estado de carga SOC
- Capacidad de los condensadores empleados C

10.1.2- VELOCIDAD DEL VIENTO v

Evidentemente, el sistema no se comportará igual para cualquier velocidad de viento. Por ejemplo, con mayores velocidades de viento es de esperar que el generador gire más rápido, con lo que la potencia reactiva inductiva aumentará y el rendimiento tenderá a verse reducido. Por ello es necesario analizar la evolución de C_P para diferentes valores de v .

10.1.3- RELACIÓN DE TRANSMISIÓN RT

Aunque hasta ahora se ha empleado la relación de transmisión obtenida mediante la multiplicadora empleada en los ensayos (a cuyo valor se ha bautizado como RT), el valor de relación de transmisión definitivo o RT no ha sido definido aún. Como es evidente, la velocidad de giro del generador también depende del valor de la relación de transmisión de la multiplicadora. Si dicha relación es muy elevada, el generador girará muy rápido y la potencia reactiva inductiva generada será mayor. Además, una relación de transmisión mayor requiere una polea muy voluminosa acoplada al eje primario (el eje de giro de la turbina), por lo que tendrá un momento de inercia mayor y será menos manejable. Tampoco es deseable un valor de RT demasiado bajo, ya que las turbinas eólicas giran a velocidades muy inferiores a las velocidades habituales de trabajo del alternador, por lo que es necesario aumentar considerablemente dicha velocidad.

En definitiva, RT es un parámetro fácilmente modificable por el diseñador y que incide enormemente en el comportamiento del sistema, razón por la que se ha decidido dejar su cálculo para el final, y así poder emplearlo para optimizar el rendimiento obtenido.

10.1.4- ESTADO DE CARGA SOC

La batería no se comporta exactamente igual para cualquier nivel de carga, ya que su tensión depende de SOC. Pero los cambios que esta variable puede originar en la batería son muy pequeños, excepto cuando alcanza el valor máximo, 1. Pero en ese caso el rendimiento del sistema carece de importancia, pues la batería ya estará cargada. Debido a esto, los cambios en el estado de carga afectarán muy poco en el rendimiento del sistema en comparación con otras variables. Es por ello que no se tendrán en cuenta las posibles variaciones de SOC cuando se analice el rendimiento del sistema.

10.1.5- NÚMERO DE COMBINACIONES A ANALIZAR

En conclusión, se tienen 3 variables (velocidad del viento v , relación de transmisión RT y condensadores C) que afectan directamente en el comportamiento del sistema y por lo tanto en el rendimiento obtenido C_P . Para poder hallar una solución que optimice todo lo posible la potencia extraída del viento se deberá ajustar conjuntamente estas 3 variables. Para ello, el método empleado es la realización de simulaciones con diferentes combinaciones de valores de esas variables.

Será necesario por lo tanto tratar de estudiar un número de valores de cada variable que sea lo suficientemente elevado como para cubrir todo el posible rango de dicha variable con el suficiente detalle. Pero no deberán emplearse más valores de los necesarios, ya que de lo contrario el número total de combinaciones a estudiar será demasiado elevado.

Si por ejemplo se considerase el mismo número de valores para cada una de las 3 variables, el número total de combinaciones a realizar sería el número de valores estudiados para cada variable elevado al cubo:

$$3^3 = 27$$

$$4^3 = 64$$

$$5^3 = 125$$

$$6^3 = 216$$

$$7^3 = 343$$

Para intentar obtener una idea representativa de todo el rango de posibilidades sin necesidad de realizar un número excesivo de combinaciones, se intentará mantener entre 4 y 6 el número de valores estudiados por cada variable. Se espera tener que realizar entre 100 y 200 simulaciones.

10.2- VALORES A ANALIZAR

10.2.1- VELOCIDAD DEL VIENTO v

Tal y como se ha explicado en el apartado de la turbina, se considerará el siguiente rango de velocidades del viento:

-4m/s, 6m/s, 8m/s, 10m/s y 12m/s.

El objetivo es cubrir lo mejor posible todo el rango de velocidades de trabajo del aerogenerador (3,4m/s-12,5m/s) empleando el valor número de valores posible (debe tenerse en cuenta que habrá que realizar simulaciones con todas las posibles combinaciones de 3 variables diferentes, por lo que si se consideran muchos valores distintos de cada variable el número de simulaciones a realizar puede ser demasiado elevado). Con esos 5 valores se espera obtener resultados bastante representativos del comportamiento del aerogenerador a velocidades altas, medias y bajas.

10.2.2- RELACIÓN DE TRANSMISIÓN RT

La relación de transmisión de la multiplicadora que se ha empleado en los ensayos RT' es de igual a 8. Sin embargo, este valor es relativamente bajo si consideramos que el alternador que se va a emplear es un alternador típico de vehículo, cuyo rango de funcionamiento habitual es de algunos miles de rpm, muy superior a la velocidad de giro del eje de la turbina. Esto se debe probablemente al hecho de que la polea empleada en este proyecto fue tomada de un proyecto anterior, en el que el alternador empleado era distinto y probablemente poseía un radio en el eje secundario inferior al nuestro, con lo que posiblemente se obtenía una relación de transmisión mayor a la que hemos obtenido nosotros.

Por ello, además de ese valor de RT' se considerarán valores otros valores de relación de transmisión un poco más elevados, hasta casi el doble de dicho valor. Concretamente:

-8, 10, 12 y 14.

10.2.3- CONDENSADORES C

Por ultimo, las simulaciones se realizarán también para distintos valores de condensadores. Se incluirá un caso en el que no se coloque ningún condensador, ya que la comparación entre este caso y aquellos en los que se usen condensadores puede ser interesante para comprender el efecto producido por los mismos sobre el sistema. Pero los valores que realmente interesan de cara al ajuste del sistema son lo que consideran la presencia de condensadores. Y como se ha visto en el apartado correspondiente a los condensadores, el valor de C adecuado varía en función de la velocidad de trabajo del generador ω_g .

Puesto que este sistema no está pensado para ser implantado en un lugar donde el recurso eólico sea especialmente abundante, sino allí donde exista la necesidad social de hacerlo, se debe optimizar el sistema especialmente para velocidades de viento bajas y medias-bajas, que son las que con toda probabilidad serán más habituales en la zona. Pero las velocidades de viento bajas se traducirán en velocidades más o menos elevadas en el alternador en función de la relación de transmisión RT empleada y del comportamiento que tenga la variable λ de la turbina, por lo que no es fácil definir qué velocidades se producirán en el generador.

Para poder acotar un poco el rango de condensadores a estudiar se va a calcular el condensador necesario para un valor de velocidad en el generador arbitrario, pero que puede considerarse una velocidad habitual de trabajo: 500rad/s. De la ecuación 5.1 del apartado del generador, la frecuencia existente con esa velocidad es la siguiente:

$$f = \frac{\omega_g \cdot p}{2\pi} = \frac{500 \cdot 6}{2\pi} = 477,46 \text{ Hz}$$

Empleando la ecuación 8.3 del apartado de los condensadores, se ha calculado el valor de C óptimo para esa frecuencia:

$$C = \frac{1}{L_s \cdot 4\pi^2 f^2} = \frac{1}{L_s \cdot 4\pi^2 477,46^2} = 158 \mu\text{F}$$

Como 500rad/s es una velocidad de trabajo muy razonable para un pequeño alternador síncrono como el nuestro, se estudiará un rango de valores de condensadores centrados aproximadamente en el valor de C obtenido para dicha velocidad. Es decir, se tomarán algunos valores de C por encima y por debajo de dicho valor, con intervalos de 50 μF entre ellos. Además, tal y como se ha comentado anteriormente, también se quiere analizar un caso en el que no se emplee ningún condensador (al cual se denominará " $C=0$ "). En conclusión, los valores que se estudiarán son los siguientes:

-0, 50 μF , 100 μF , 150 μF , 200 μF 250 μF

10.3- SIMULACIONES CON VELOCIDAD DEL VIENTO v CONSTANTE

Se realizan simulaciones para cada una de las combinaciones mencionadas, mostrando los resultados del rendimiento de la turbina C_P , la potencia del viento P_V y la potencia del generador P_g . A modo de ejemplo, en la figura 10.1 se muestra la simulación correspondiente a $v=4\text{m/s}$, $RT=8$ y $C=150\mu\text{F}$ (el resto de casos son mostrados en la carpeta adjunta *Simulaciones con distintas combinaciones de v , RT y C*).

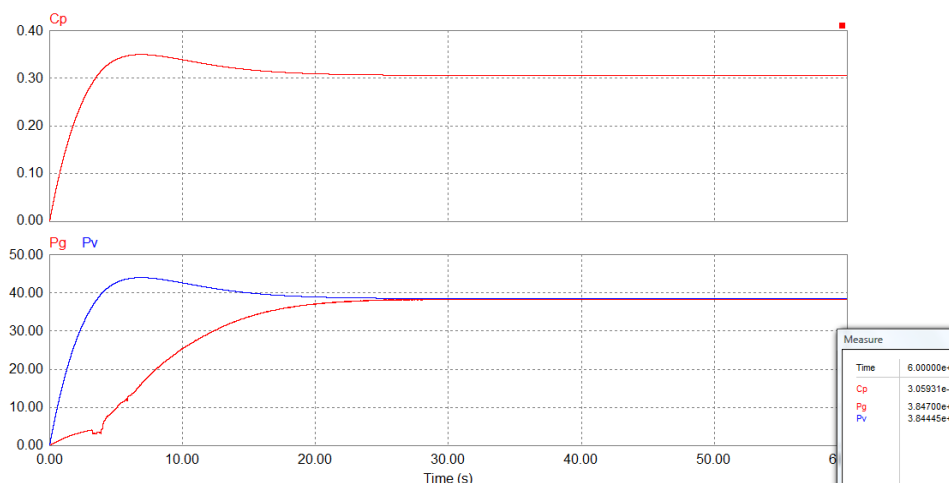


Fig. 10.1: Resultado de C_P , P_V y P_g para $v=4\text{m/s}$, $RT=8$ y $C=150\mu\text{F}$

El resultado de P_g obtenido para cada una de las combinaciones se muestra en la tabla de la figura 10.2 (valores de C mostrados en μF):

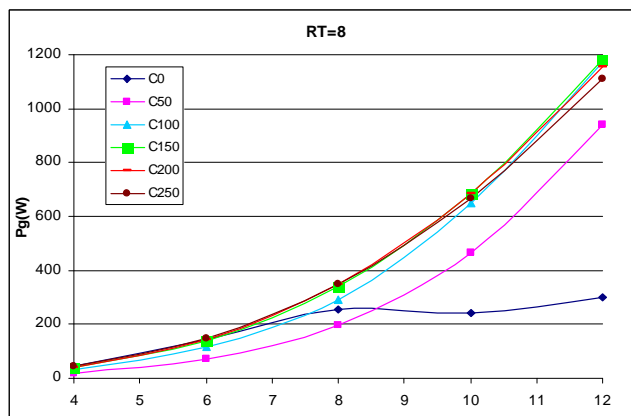
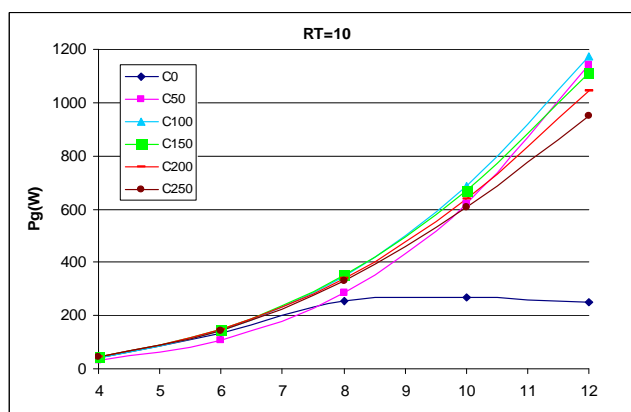
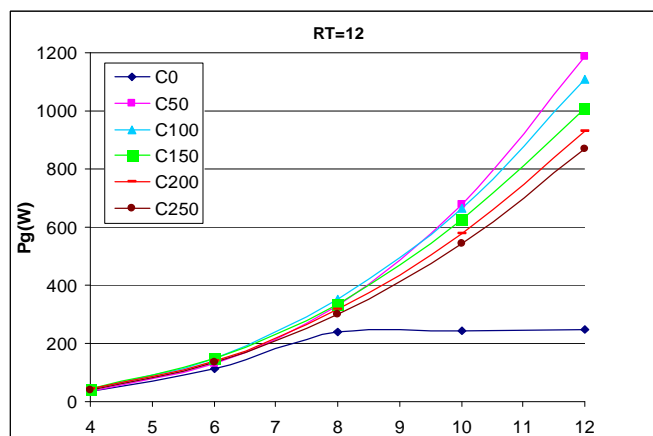
$v = 4$						P_g media =	39,02
RT \ C	0	50	100	150	200	250	
8	43,14	19,66	32,24	38,47	41,51	43,11	
10	39,57	29,12	40,15	43,37	43,98	43,65	
12	35,35	36,13	43,45	43,79	42,71	41,23	
14	31,67	40,35	43,76	42,13	39,96	37,95	
$v = 6$						P_g media =	132,16
RT \ C	0	50	100	150	200	250	
8	141,85	71,29	116,1	136,92	144,06	148,06	
10	135,28	107	140,72	148,03	148,12	144,27	
12	111,01	131,75	148,1	146,01	140,1	133,77	
14	100,17	143,83	146,69	137,94	129,4	121,48	
$v = 8$						P_g media =	306,77
RT \ C	0	50	100	150	200	250	
8	255,32	196,87	292,62	340,88	351,16	350,61	
10	254,85	284,36	346,56	351,1	341,23	329,49	
12	241,03	331,44	350,54	334,1	315,39	299,08	
14	244,07	349,7	337,66	310,89	285,55	267,98	
$v = 10$						P_g media =	556,27
RT \ C	0	50	100	150	200	250	
8	243,16	465,21	649,02	685,82	683,62	668,19	
10	266,58	618,96	685,62	669,1	638,33	605,03	
12	245,34	678,74	667,28	625,87	579,31	543,05	
14	249,23	685,61	626,03	567,61	520,23	483,42	
$v = 12$						P_g media =	909,44
RT \ C	0	50	100	150	200	250	
8	300,88	938,95	1171,75	1183,02	1154,62	1112,11	
10	247,82	1140,46	1175,03	1109,67	1045,88	948,43	
12	246,31	1186,09	1106,73	1008,39	930,3	867,76	
14	251,22	1162,82	1023,14	918,8	830,08	766,33	

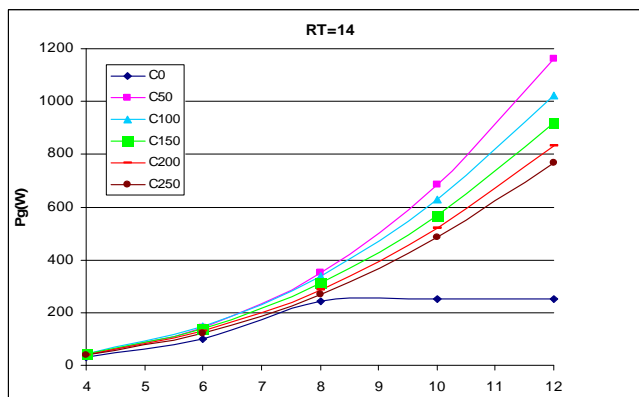
Fig. 10.2: Valores de P_g obtenidos con cada una de las combinaciones analizadas

10.4- ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

10.4.1- ANÁLISIS SEGÚN VALORES DE RT

En la hoja Excel adjunta *Resultados de simulaciones con distintas combinaciones de v , RT y C* se han agrupado los datos en gráficas según valores de RT (figuras 10.3, 10.4, 10.5 y 10.6). En ellas se aprecia claramente que si no se emplean condensadores la potencia se estanca para velocidades medias y altas, frente a la mejora producida cuando por los condensadores para contrarrestar la potencia reactiva inductiva de la inductancia síncrona del generador.

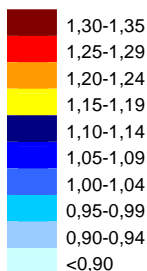
Fig. 10.3: Potencias obtenidas para $RT=8$ Fig. 10.4: Potencias obtenidas para $RT=10$ Fig. 10.5: Potencias obtenidas para $RT=12$

Fig. 10.6: Potencias obtenidas para $RT=14$

10.4.2- MÁXIMAS POTENCIAS EN EL GENERADOR

A partir de los datos de la figura 10.2 se ha calculado la media aritmética de todas las potencias obtenidas para cada valor de velocidad del viento v . Después se ha dividido cada valor de potencia por la media correspondiente, obteniendo los datos de la figura 10.7 (promedios mostrados a la derecha):

$v=4$						
RT \ C	0	50	100	150	200	250
8	1,11	0,50	0,83	0,99	1,06	1,10
10	1,01	0,75	1,03	1,11	1,13	1,12
12	0,91	0,93	1,11	1,12	1,09	1,06
14	0,81	1,03	1,12	1,08	1,02	0,97
Pg media = 39,02 W						
$v=6$						
RT \ C	0	50	100	150	200	250
8	1,07	0,54	0,88	1,04	1,09	1,12
10	1,02	0,81	1,06	1,12	1,12	1,09
12	0,84	1,00	1,12	1,10	1,06	1,01
14	0,76	1,09	1,11	1,04	0,98	0,92
Pg media = 132,16 W						
$v=8$						
RT \ C	0	50	100	150	200	250
8	0,83	0,64	0,95	1,11	1,14	1,14
10	0,83	0,93	1,13	1,14	1,11	1,07
12	0,79	1,08	1,14	1,09	1,03	0,97
14	0,80	1,14	1,10	1,01	0,93	0,87
Pg media = 306,77 W						
$v=10$						
RT \ C	0	50	100	150	200	250
8	0,44	0,84	1,17	1,23	1,23	1,20
10	0,48	1,11	1,23	1,20	1,15	1,09
12	0,44	1,22	1,20	1,13	1,04	0,98
14	0,45	1,23	1,13	1,02	0,94	0,87
Pg media = 556,27 W						
$v=12$						
RT \ C	0	50	100	150	200	250
8	0,33	1,03	1,29	1,30	1,27	1,22
10	0,27	1,25	1,29	1,22	1,15	1,04
12	0,27	1,30	1,22	1,11	1,02	0,95
14	0,28	1,28	1,13	1,01	0,91	0,84
Pg media = 909,44 W						

Fig. 10.7: Valores de P_g divididos entre los promedios

En la figura 10.7 se muestra cada alternativa resaltada en colores en función de la mejora o empeoramiento que represente cada valor de potencia obtenido con respecto de la media. Se aprecia una cierta cresta de valores más elevados que el resto ubicada diagonalmente en la tabla, desde la zona inferior izquierda hasta la esquina superior derecha.

En principio, es de suponer que las mayores velocidades de giro en el generador ω_g se han obtenido para las combinaciones en las que se han empleado valores superiores de RT . Nótese que decimos en principio, porque la velocidad de giro del generador también depende de la variable λ , que como se sabe aporta la relación entre la velocidad del viento v y la velocidad de giro de la turbina ω . En algunos casos podría ocurrir que empleándose una relación de transmisión superior se modificara el comportamiento del sistema conduciendo a la turbina a un punto de trabajo de la curva C_P - λ situado más a la izquierda, con un valor de λ menor. Si esto ocurriera, a pesar de una relación de transmisión superior, la velocidad de giro del generador podría llegar a ser inferior.

Sin embargo, los valores de C_P correspondientes a todas esas combinaciones situadas en la diagonal de valores máximos son muy parecidos entre sí, puesto que todos ellos son valores cercanos a C_{Pmax} (0,35). Por lo tanto, los valores de λ para todas esas situaciones también son muy parecidos, y presumiblemente cercanos al valor de λ con el que se produce el rendimiento máximo, λ^* (5). Esto indica que la suposición antes realizada, según la cual las mayores velocidades de giro en el generador ω_g se han obtenido para las combinaciones en las que se han empleado relaciones de transmisión superiores, es cierta.

Por lo tanto, es razonable concluir a partir de la figura 10.7 que el valor de condensador que mejor rendimiento produce disminuye a medida que se aumenta la velocidad, ya que la cresta de valores máximos atraviesa la tabla desde la parte inferior izquierda (altos valores de RT y bajos valores de C) hasta la parte superior derecha (bajos valores de RT y altos valores de C). Esta conclusión coincide plenamente con lo demostrado en la ecuación 8.3 del apartado de los condensadores. En dicha ecuación se comprobaba como si se igualan las reactancias inductiva de la máquina y capacitiva de los condensadores para que se anulen mutuamente, se obtiene que el condensador a emplear depende de la inversa del cuadrado de la frecuencia a la que opera el generador.

10.4.3- PONDERACIÓN DE RESULTADOS SEGÚN VELOCIDAD DE VIENTO

Las combinaciones analizadas anteriormente comprenden diferentes valores de tres variables: v , RT y C . Pero a diferencia de RT y C , la velocidad del viento v no es un parámetro que podamos diseñar sino una entrada variable en el sistema que no podemos controlar. Por ello, no tiene sentido tratarla como una variable más dentro de las posibles combinaciones alternativas. Debido a esto, se van a agrupar los resultados obtenidos para cada combinación de RT y C , aunque hayan sido logrados mediante velocidades de viento distintas.

Una forma muy sencilla de obtener un valor que represente a una combinación concreta de RT y C podría ser la media aritmética de los valores obtenidos con esa combinación para cada velocidad de viento estudiada. Pero no tiene sentido conceder la misma relevancia a todas esas velocidades, ya que ni todas generan la misma potencia ni todas ocurren con la misma probabilidad.

En los emplazamientos donde se instalan grandes parques eólicos (habitualmente en lugares donde el recurso eólico es especialmente abundante), el valor medio de la velocidad del viento suele ser cercano a 6m/s. Pero nuestro emplazamiento no estará situado necesariamente en una zona de abundante recurso eólico. De hecho, probablemente estará rodeado de edificios cercanos que generen perturbaciones y reduzcan la velocidad del viento, por lo que lo probablemente la velocidad media del viento será bastante inferior en nuestro caso. Por lo tanto, de entre todas las velocidades consideradas en el análisis, las velocidades más habituales serán con gran diferencia las velocidades de viento más bajas. Debido a esto, y a pesar de que las velocidades más altas producen más vatios, parece razonable pensar que las velocidades bajas producirán a lo largo del tiempo más energía que las velocidades de viento altas. Por lo tanto, lo lógico parece tratar de optimizar el sistema dando especial relevancia a estas velocidades.

La probabilidad de que ocurra un determinado valor de velocidad de viento posee una distribución en forma de campana de Weibull, como la que se muestra en la figura 10.8:

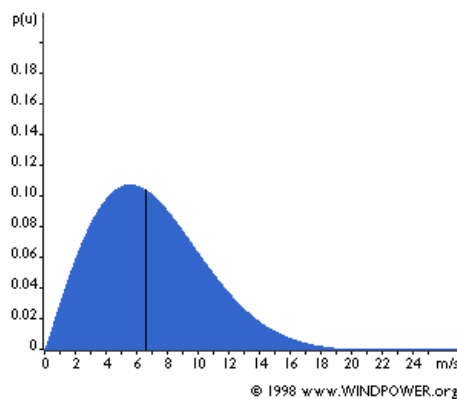


Fig. 10.8: Valores de P_g divididos entre los promedios

Como se puede apreciar, la forma de la campana es tal que una vez que se alcanza el máximo, la probabilidad disminuye bruscamente. De aquí se puede deducir que en nuestro caso, tras alcanzar el máximo con velocidades bajas, la probabilidad de que ocurran velocidades medias se verá enormemente reducida.

Sin embargo, una vez que se han alcanzado velocidades altas y la probabilidad ha decrecido hasta valores cercanos a cero, la pendiente de la curva disminuye notablemente, de manera que aunque la velocidad continúe aumentando, su probabilidad ya apenas desciende. De aquí se puede concluir que los valores muy elevados de velocidad de viento serán prácticamente igual de probables que las velocidades medias-altas.

A su vez, cuando ocurren velocidades de viento elevadas cada pequeño incremento de velocidad se traduce en un aporte de potencia muy grande, mucho mayor que el que producirían esos mismos incrementos si ocurrieran con velocidades más bajas (nótese que la potencia extraída P_V depende de la velocidad del viento al cubo).

En definitiva, si bien las velocidades elevadas en general no son de gran interés en este estudio, se tomarán en mayor consideración las velocidades de viento muy altas frente a las medias-altas, puesto que la probabilidad de que ocurran ambas es similar (muy baja) pero la potencia aportada por las primeras es mucho mayor.

Teniendo en cuenta los razonamientos anteriores, se han ponderado los resultados obtenidos con cada una de las combinaciones de la tabla 10.7. Concretamente, se han multiplicado los resultados por los factores de ponderación siguientes:

$v = 4\text{m/s}$: factor de ponderación = 1,10
 $v = 6\text{m/s}$: factor de ponderación = 1,05
 $v = 8\text{m/s}$: factor de ponderación = 0.95
 $v = 10\text{m/s}$: factor de ponderación = 0.90
 $v = 12\text{m/s}$: factor de ponderación = 0.95

La figura 10.9 muestra los resultados de dicha ponderación:

v = 4				ponderación: 1,10		
RT \ C	0	50	100	150	200	250
8	1,22	0,55	0,91	1,08	1,17	1,22
10	1,12	0,82	1,13	1,22	1,24	1,23
12	1,00	1,02	1,22	1,23	1,20	1,16
14	0,89	1,14	1,23	1,19	1,13	1,07
v = 6				ponderación: 1,05		
RT \ C	0	50	100	150	200	250
8	1,13	0,57	0,92	1,09	1,14	1,18
10	1,07	0,85	1,12	1,18	1,18	1,15
12	0,88	1,05	1,18	1,16	1,11	1,06
14	0,80	1,14	1,17	1,10	1,03	0,97
v = 8				ponderación: 0,95		
RT \ C	0	50	100	150	200	250
8	0,79	0,61	0,91	1,06	1,09	1,09
10	0,79	0,88	1,07	1,09	1,06	1,02
12	0,75	1,03	1,09	1,03	0,98	0,93
14	0,76	1,08	1,05	0,96	0,88	0,83
v = 10				ponderación: 0,90		
RT \ C	0	50	100	150	200	250
8	0,39	0,75	1,05	1,11	1,11	1,08
10	0,43	1,00	1,11	1,08	1,03	0,98
12	0,40	1,10	1,08	1,01	0,94	0,88
14	0,40	1,11	1,01	0,92	0,84	0,78
v = 12				ponderación: 0,95		
RT \ C	0	50	100	150	200	250
8	0,31	0,98	1,22	1,24	1,21	1,16
10	0,26	1,19	1,23	1,16	1,09	0,99
12	0,26	1,24	1,16	1,05	0,97	0,91
14	0,26	1,21	1,07	0,96	0,87	0,80

Fig. 10.9: Valores de P_g divididos entre los promedios y ponderados según v

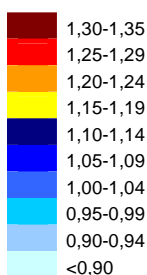
Se puede apreciar como los excelentes resultados obtenidos en la figura 10.7 para velocidades altas se han moderado un poco (aunque menos en el caso de las velocidades muy altas), mientras que los valores de las velocidades más bajas han ganado algo de peso.

10.4.4- RESULTADO FINAL

Una vez que a cada valor se le ha otorgado un peso más acorde con nuestros intereses es posible obtener un resultado final para cada combinación de RT y C calculando la media aritmética de los resultados obtenidos para distintas velocidades de viento (figura 10.10, todos los datos han sido calculados mediante el archivo Excel adjunto *Resultados de simulaciones con distintas combinaciones de v , RT y C*):

valoración ponderada de cada alternativa						
RT \ C	0	50	100	150	200	250
8	0,77	0,69	1,00	1,11	1,14	1,14
10	0,73	0,95	1,13	1,15	1,12	1,07
12	0,66	1,09	1,14	1,10	1,04	0,99
14	0,62	1,14	1,11	1,02	0,95	0,89

Fig. 10.10: Resultado final de cada combinación de RT y C



Como se puede apreciar en la figura, la combinación que cosecha el mejor resultado (1,15) es la correspondiente a $RT=10$ y $C=150\mu F$. De todas maneras, la diferencia con respecto de los resultados obtenidos por otras alternativas situadas en esa diagonal es muy pequeña, ya que varias opciones alcanzan valores de 1,14 ó 1,13. También se aprecia claramente que la no utilización de condensadores no es nada recomendable en ninguno de los casos. Por otro lado, la cresta de valores máximos situada en la diagonal parece estar mejor definida de lo que estaba anteriormente, ya que se han unificado en cada alternativa los efectos producidos con diferentes velocidades de viento.

El valor máximo se sitúa además en la zona central de la tabla, lo que es significativo: si partiendo de dicho valor nos desplazamos en cualquier dirección, la pendiente es en todos los casos descendiente. Si dicho valor máximo hubiera estado situado en un extremo en lugar de estar en la zona central, cabría preguntarse si una combinación adyacente (situada fuera de la tabla y por lo tanto no contemplada en el estudio) habría cosechado un resultado mejor.

En conclusión los valores de RT y C que se emplearán son 10 y $150\mu F$ respectivamente. Estos son además valores asumibles, tanto desde el punto de vista del tamaño necesario de la polea de la multiplicadora como de los condensadores a la salida del generador).

10.4.5- REVISIÓN DE CÁLCULOS REALIZADOS A PARTIR DE RT'

No debe olvidarse que en el apartado de la multiplicadora se ha partido de un valor de relación de transmisión al que se ha llamado RT' el momento de inercia transferido al secundario. Es necesario revisar dichos cálculos, ya que si las desviaciones producidas entre el valor anterior y el correspondiente al nuevo valor de RT son muy grandes habría que reajustar y volver a analizar.

Con $RT' = 8$, el momento de inercia de la polea de la multiplicadora adquiriría el siguiente valor:

$$J_M = \frac{1}{2} \cdot m_M \cdot r_M^2 = \frac{1}{2} \cdot 1,8 \cdot 0,22^2 = 0,0436 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

Pero, como se ha visto en la ecuación 4.2 del apartado de la multiplicadora, la relación de transmisión depende de la relación entre radios:

$$r_1 = RT \cdot r_2$$

Por lo que para que RT sea 10, el radio de la multiplicadora deberá ser el siguiente:

$$r_M = 0,22 \cdot \frac{10}{8} = 0,275$$

Si pasamos de un radio de polea de 0,22m a 0,275m el peso aumentará, aunque no lo hará de forma proporcional, ya que ni el volumen es directamente proporcional al radio ni todo el volumen está ocupado (la polea posee un vaciado en su interior que la hace más ligera). Una forma sencilla de extrapolar el peso es calcular la densidad aparente de la polea. Es decir, suponer que el peso de la polea se corresponde a todo su volumen, como si la polea fuera maciza y estuviera hecha de un material de densidad inferior a la densidad del material real. Haciendo esto, y sabiendo que el espesor de la polea es de aproximadamente 35mm, la densidad aparente de la polea con $RT' = 8$ es:

$$\rho_{M'} = \frac{m_{MRT'}}{V_{MRT'}} = \frac{m_{MRT'}}{\pi \cdot r_{MRT'}^2 \cdot e_{M'}} = \frac{1,8}{\pi \cdot 0,22^2 \cdot 0,035} = 338,23 \text{ kg} / \text{m}^3$$

Si suponemos que la polea de $RT = 10$ posee la misma densidad aparente y un espesor similar, su peso debería ser el siguiente:

$$m_M = V_{MRT'} \cdot \rho_M = \pi \cdot r_M^2 \cdot e_M \cdot \rho_{M'} = \pi \cdot 0,275^2 \cdot 0,035 \cdot 338,23 = 2,8 \text{ kg}$$

Por lo que el momento de inercia de la multiplicadora será:

$$J_{MRT'} = \frac{1}{2} \cdot m_M \cdot r_M^2 = \frac{1}{2} \cdot 2,8 \cdot 0,275^2 = 0,1058 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

Este momento de inercia es bastante mayor que el obtenido anteriormente ($J_{MRT'} = 0,0436 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$). Sin embargo, como se ha visto en el apartado de la

multiplicadora el parámetro que realmente afecta al sistema es el momento de inercia visto desde el secundario J_{T2} , en el cual el momento de inercia de la multiplicadora no tiene demasiada relevancia, ya que es por ejemplo muy inferior al momento de inercia de las palas de la turbina ($J_P = 0,8386 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$).

En el apartado de la multiplicadora se ha calculado con $RT' = 8$ un momento de inercia visto desde el secundario $J_{T2RT'}$ de $0,0346 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$. Con el nuevo valor de $RT = 10$ el resultado obtenido es el siguiente:

$$J_{T2} = \frac{J_P}{RT^2} + \frac{J_{MRT'}}{RT^2} + J_G = \frac{0,8386}{10^2} + \frac{0,1058}{10^2} + 0,0219 = 0,0313 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$$

Como puede observarse, el valor resultante del momento de inercia visto desde el secundario se mantiene en el mismo orden de magnitud que el valor obtenido anteriormente, siendo además la diferencia entre ellos realmente pequeña. Debido a ello, el error que se ha podido producir en las simulaciones anteriores se considera totalmente despreciable, por lo que los resultados obtenidos en dichas simulaciones y los análisis realizados a partir de ellos son válidos.

11- SIMULACIONES CON VIENTO REAL

A continuación se realizarán simulaciones con el modelo completo partiendo de datos reales de viento. Para ello se utilizarán algunos registros realizados en estaciones meteorológicas. Lo más habitual suele ser que dichos registros sean diezminutales, y los datos sean tomados con un tiempo de muestreo de 1 segundo.

11.1- VELOCIDADES DE VIENTO BAJAS CON $R_T = 10$ Y $C = 150\mu F$

11.1.1 ANÁLISIS DE LAS VELOCIDADES REGISTRADAS

En este apartado se mostrarán las simulaciones obtenidas a partir de uno de esos registros diezminutales. Se han introducido los datos de velocidad de viento recogidos a lo largo de esos 10 minutos en la hoja Excel adjunta *Registros de viento diezminutales* y se ha obtenido la representación de la velocidad en el tiempo de la figura 11.1:

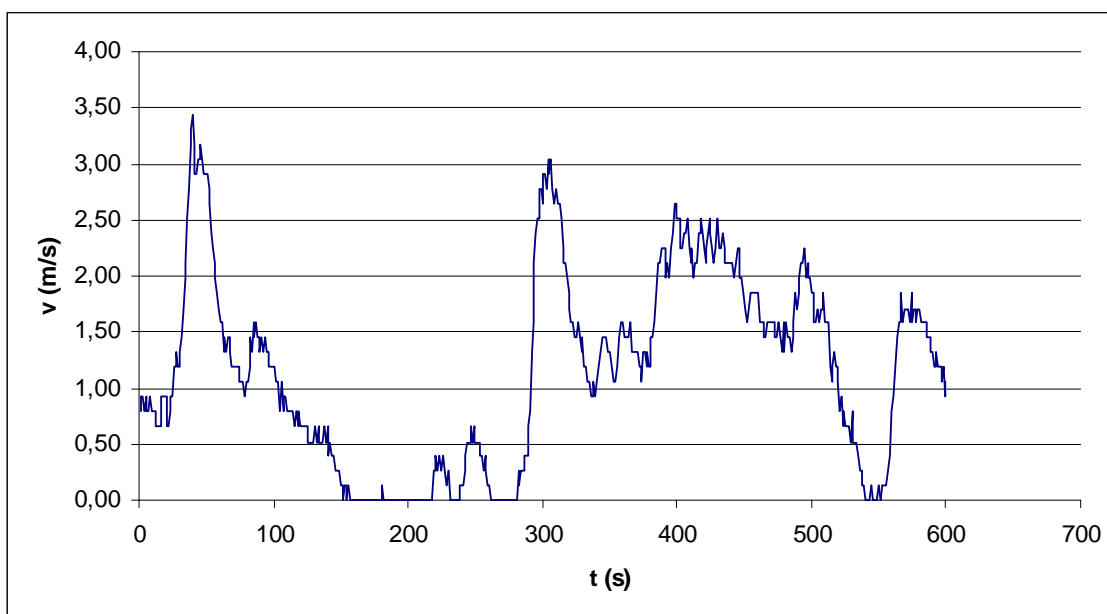
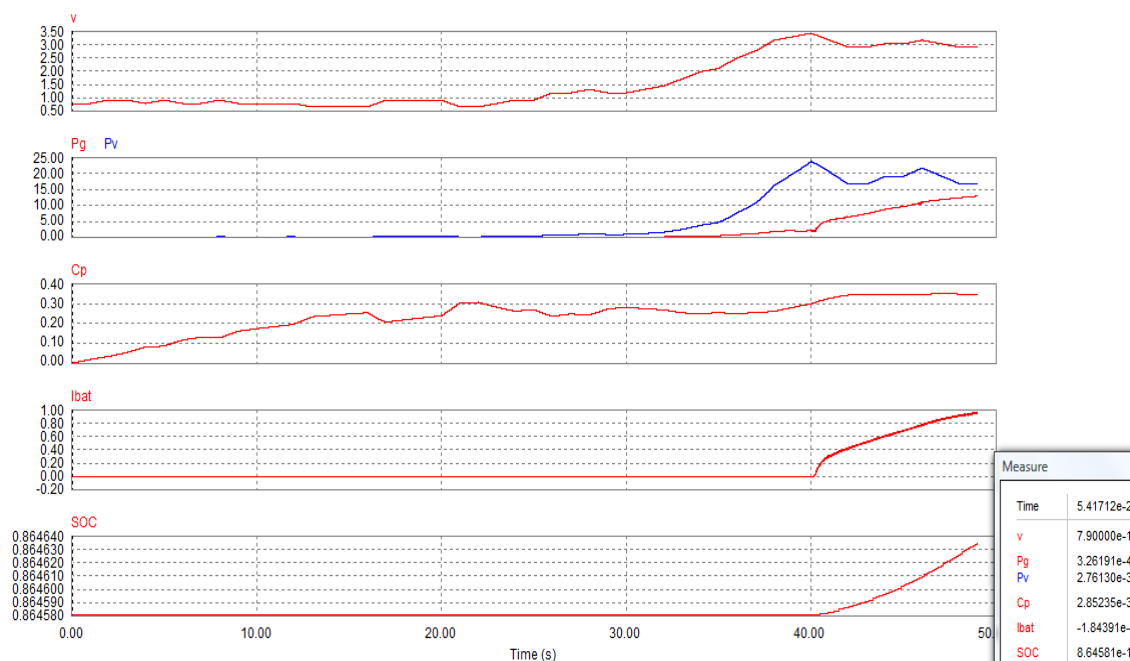
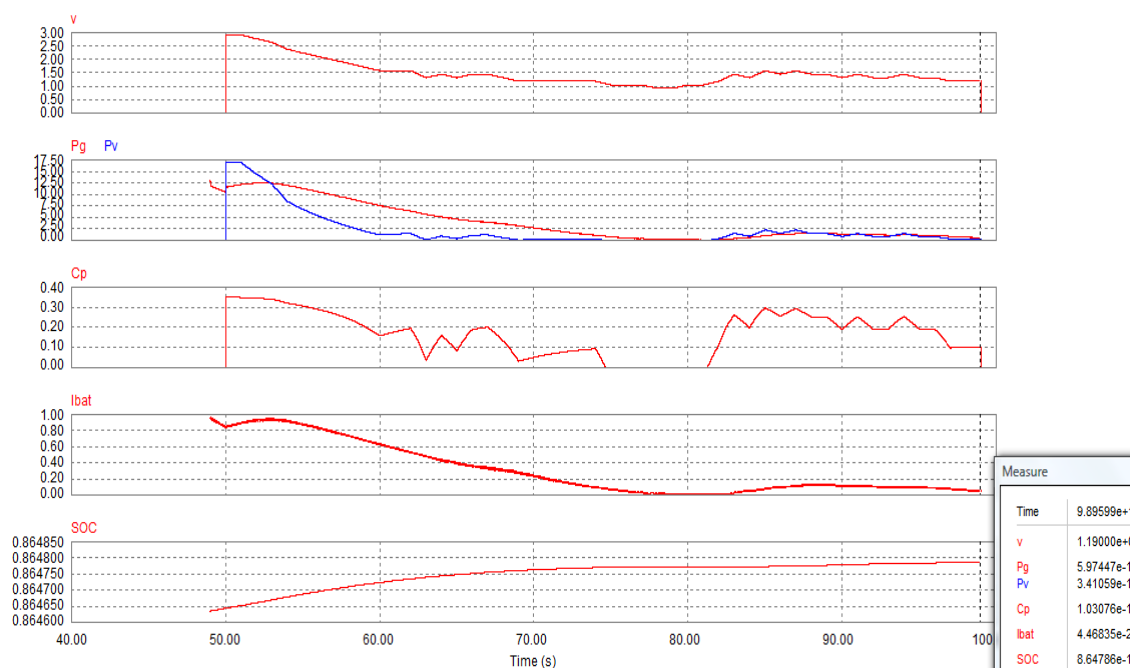


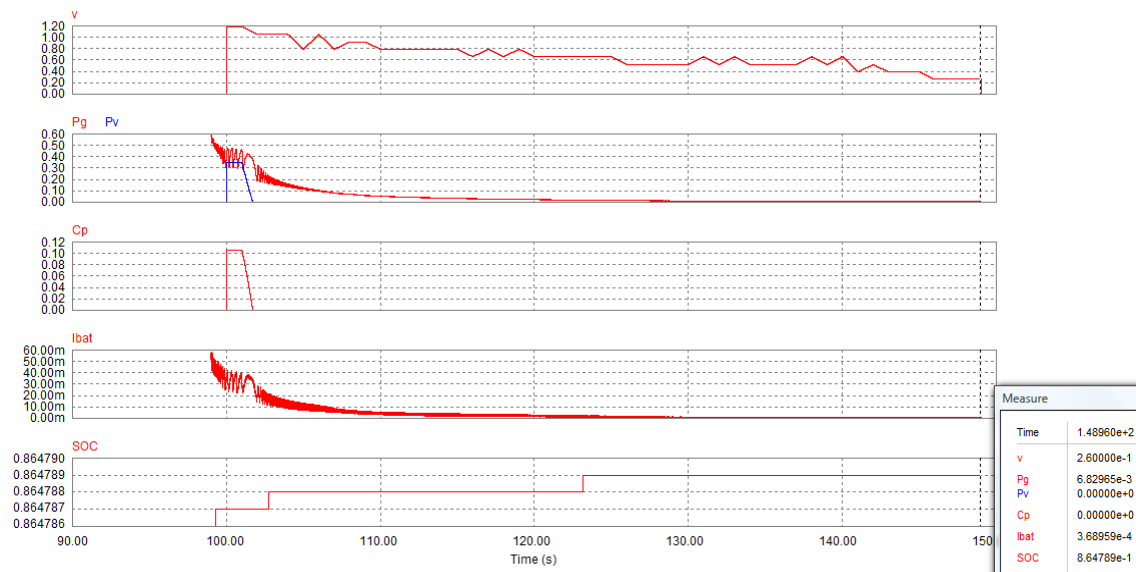
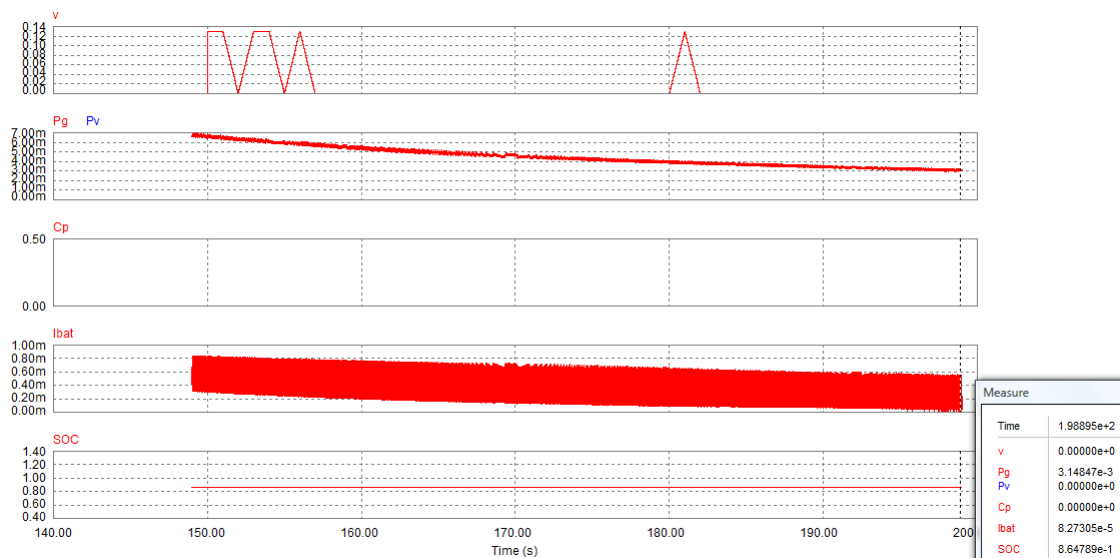
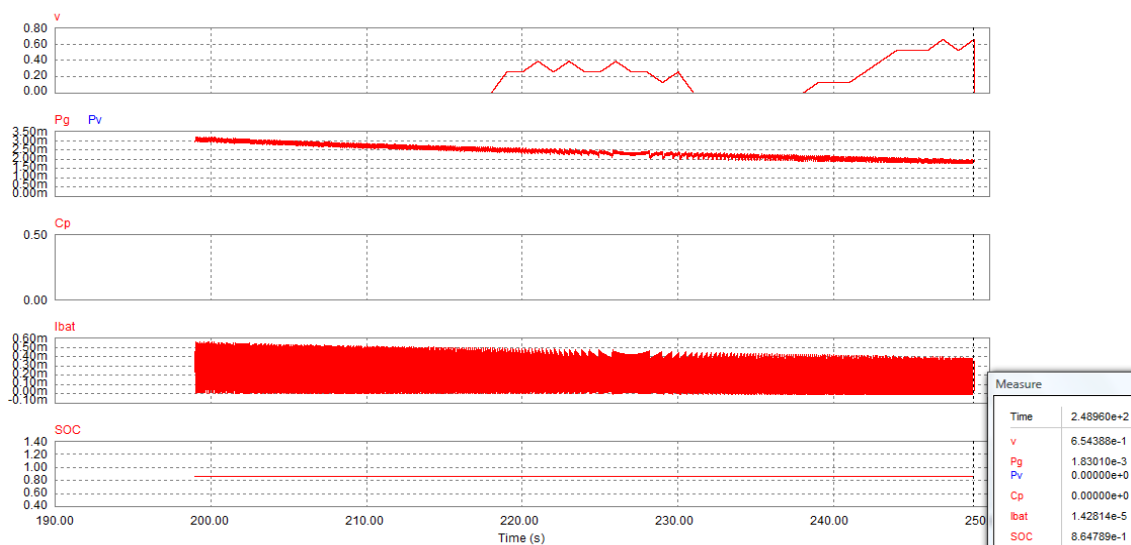
Fig 11.1: Evolución de la velocidad del viento v en el tiempo

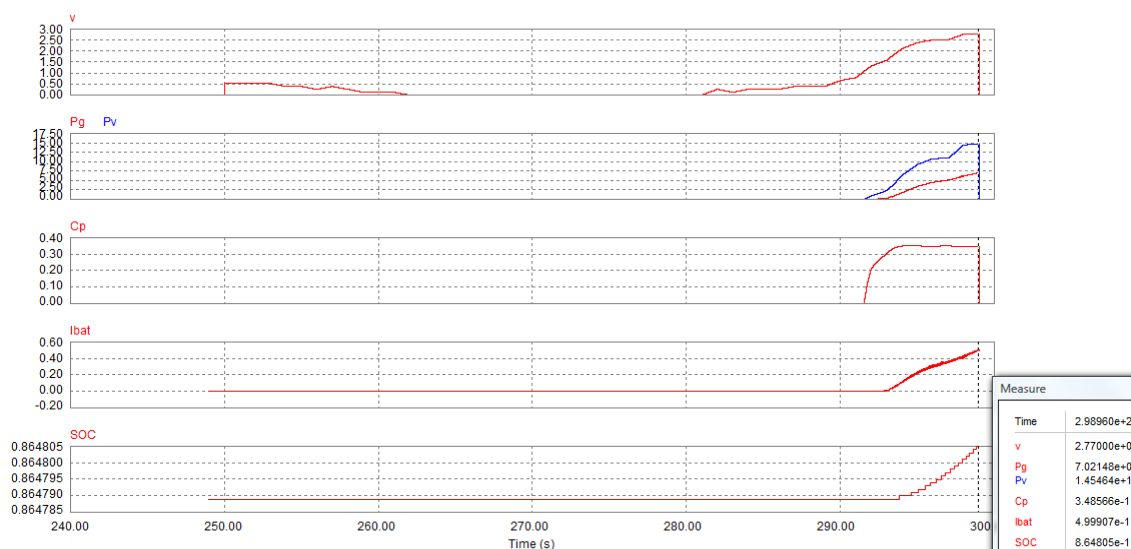
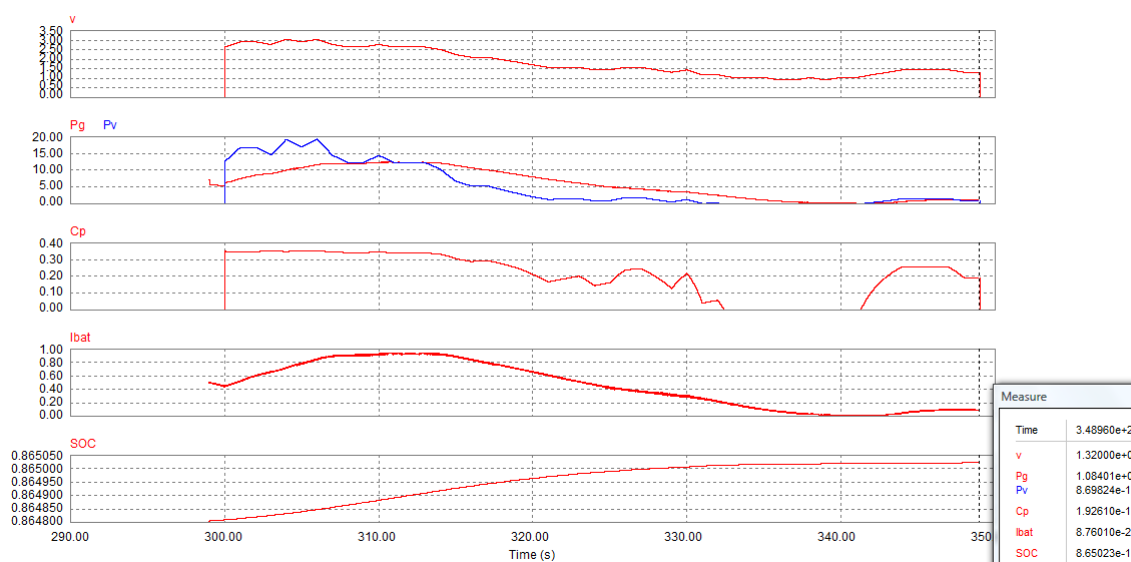
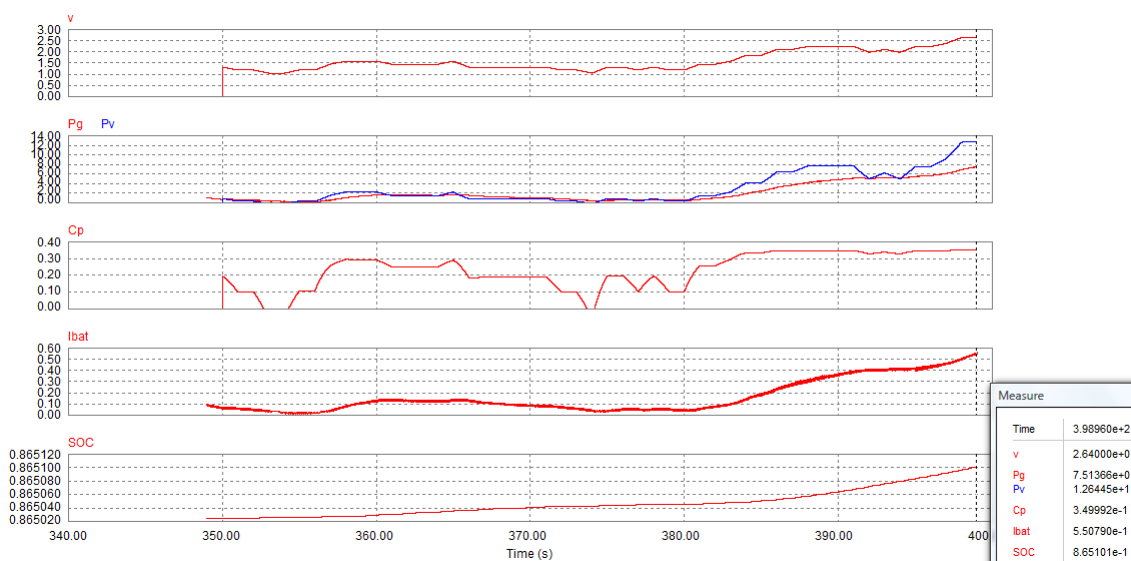
Como puede comprobarse con facilidad, los datos recogidos muestran una velocidad de viento muy baja: el valor máximo registrado es de tan sólo 3,43m/s, y de hecho el mayor volumen de datos se sitúa por debajo de 2m/s. Nótese que se ha considerado una velocidad mínima de funcionamiento de la turbina de 3,5m/s, emulando ejemplos de aerogeneradores con características similares al nuestro. Es decir, ni siquiera se llega a alcanzar la velocidad mínima a partir de la cual los fabricantes de aerogeneradores pueden garantizar que el sistema suministra alguna potencia útil.

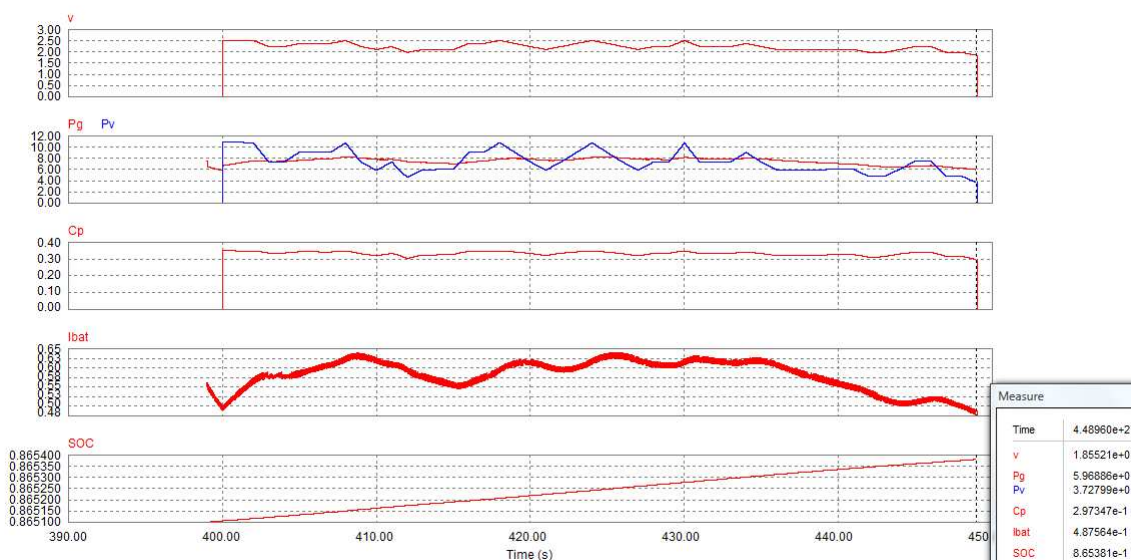
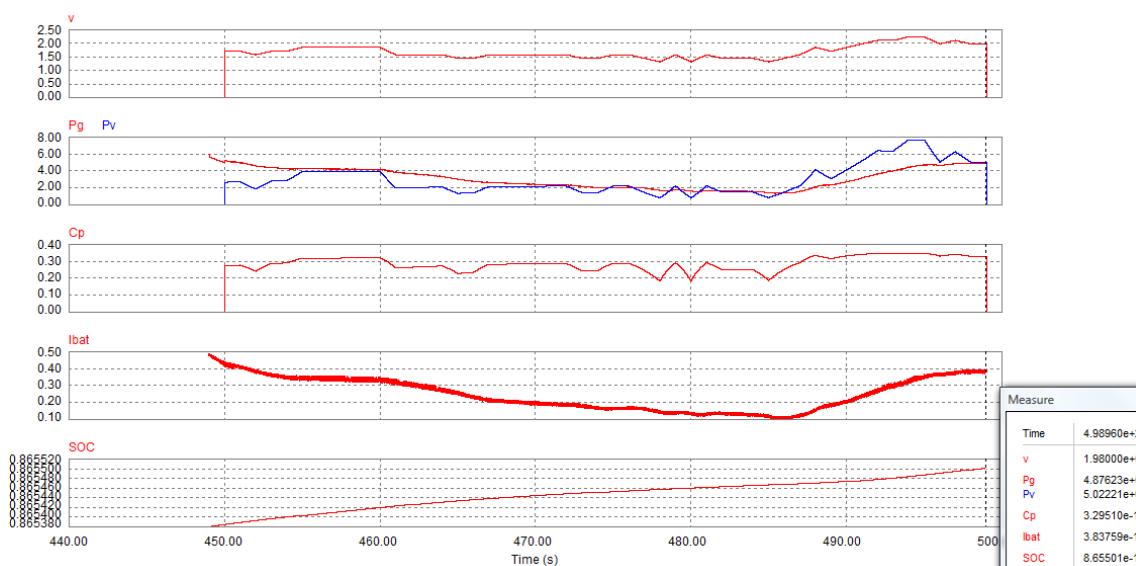
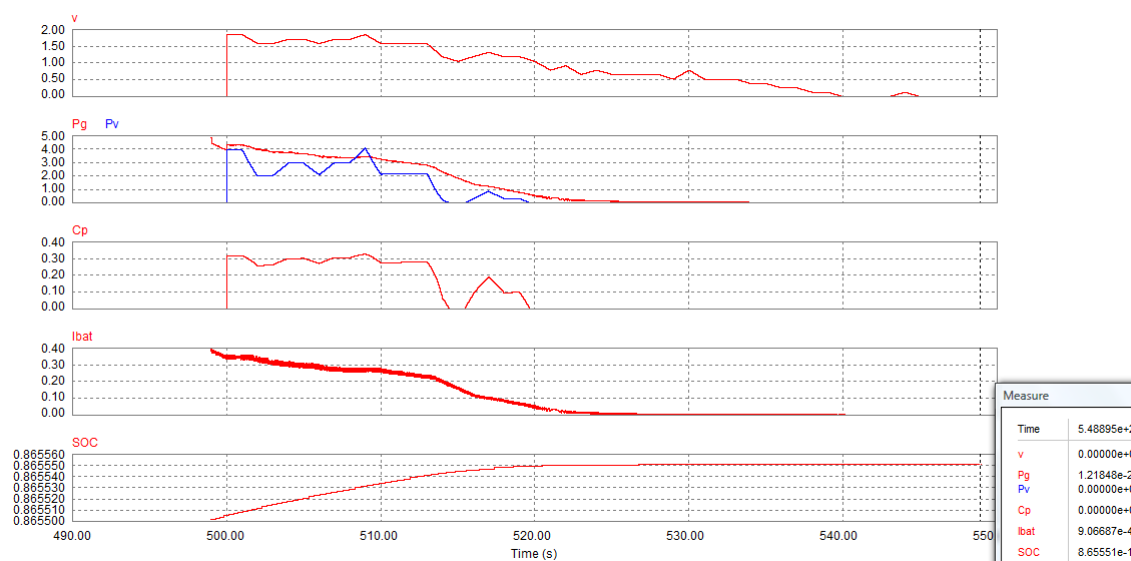
11.1.2 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

A continuación se muestran los valores de velocidad de viento v , coeficiente de potencia de la turbina C_P , potencia del viento P_v , potencia en el generador P_g , energía en el generador E_g , corriente en la batería I_{bat} y estado de carga de la batería SOC obtenidos a partir de este registro diezminutal. Aunque la simulación se llevó a cabo de forma continua durante esos 10 minutos, para que se puedan interpretar mejor los resultados, éstos se han dividido en tramos de 50 segundos:

Fig 11.2: Valores de v , P_g , P_v , C_P , I_{bat} y SOC obtenidos durante el tramo 1 de la simulaciónFig 11.3: Valores de v , P_g , P_v , C_P , I_{bat} y SOC obtenidos durante el tramo 2 de la simulación

Fig 11.4: Valores de v , P_g , P_v , C_p , I_{bat} y SOC obtenidos durante el tramo 3 de la simulaciónFig 11.5: Valores de v , P_g , P_v , C_p , I_{bat} y SOC obtenidos durante el tramo 4 de la simulaciónFig 11.6: Valores de v , P_g , P_v , C_p , I_{bat} y SOC obtenidos durante el tramo 5 de la simulación

Fig 11.7: Valores de v , P_g , P_v , C_p , I_{bat} y SOC obtenidos durante el tramo 6 de la simulaciónFig 11.8: Valores de v , P_g , P_v , C_p , I_{bat} y SOC obtenidos durante el tramo 7 de la simulaciónFig 11.9: Valores de v , P_g , P_v , C_p , I_{bat} y SOC obtenidos durante el tramo 8 de la simulación

Fig 11.10: Valores de v , P_g , P_v , C_p , I_{bat} y SOC obtenidos durante el tramo 9 de la simulaciónFig 11.11: Valores de v , P_g , P_v , C_p , I_{bat} y SOC obtenidos durante el tramo 10 de la simulaciónFig 11.12: Valores de v , P_g , P_v , C_p , I_{bat} y SOC obtenidos durante el tramo 11 de la simulación

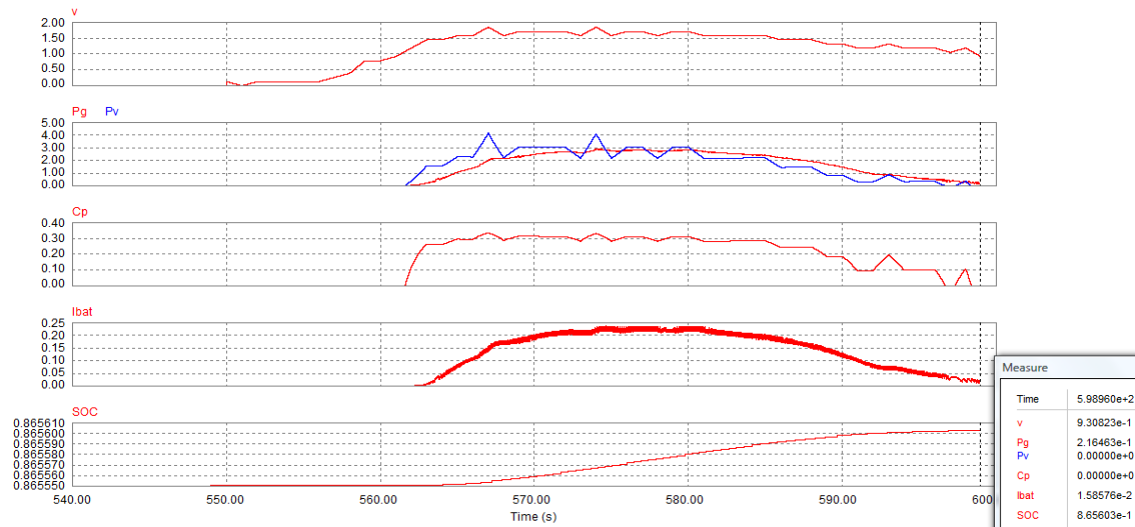


Fig 11.13: Valores de v , P_g , P_v , C_p , I_{bat} y SOC obtenidos durante el tramo 12 de la simulación

11.1.3 VALORACIÓN DEL RESULTADO DE C_p

El resultado obtenido de C_p es fundamental, puesto que de ello depende el valor de la potencia del viento P_v . Para que la potencia obtenida en el generador P_g pueda ser alta y la batería se cargue con rapidez, se requiere que el valor de C_p sea elevado. Del análisis de los resultados se desprende que la evolución de C_p no es la misma para todos los valores de velocidad:

-Con velocidades superiores a 2m/s, C_p se sitúa en el rango de valores máximos, entre 0,30 y 0,35 (donde $C_{pmax} = 0,35$). Los cambios en la velocidad del viento producen pequeñas oscilaciones de C_p que se corrigen con rapidez.

-Con velocidades comprendidas entre 1,5m/s y 2m/s, C_p varía entre los valores 0,20 y 0,30 aproximadamente. Las oscilaciones que se producen en C_p cuando la velocidad del viento varía son bastante suaves.

-Con velocidades de entre 1m/s y 1,5m/s, el rango de valores en el que se sitúa C_p es mayor que en los casos anteriores (desde valores cercanos a 0 hasta 0,2). Cuando se producen variaciones de velocidad las oscilaciones provocadas en C_p son más caóticas, especialmente si dichas variaciones de velocidad son descensos bruscos.

-Con velocidades inferiores a 1m/s, C_p se sitúa la mayor parte del tiempo en valores cercanos a 0. Cuando se producen variaciones bruscas de velocidad C_p se anula inmediatamente, y sólo si hay crecimientos muy progresivos de la velocidad C_p va aumentando poco a poco hacia valores más elevados. En algunos casos en los que la velocidad se mantiene muy estable, C_p puede llegar a crecer hasta valores excepcionalmente elevados (como ocurre en el tramo 1, donde llega a ser 0,3 sin que v sea superior a 1m/s).

Estos resultados se corresponden bastante con lo esperado. El hecho de que con viento prácticamente nulo se produzca un comportamiento inestable de C_p y que por lo general posea valores bajos es lógico, puesto que cualquier

sistema eólico de generación posee unos valores mínimos de velocidad por debajo de los cuáles no es capaz de funcionar de forma de manera adecuada. De hecho, ésta es una de las razones por las que los fabricantes de aerogeneradores establecen un límite inferior de velocidad de trabajo, por debajo de la cual no garantizan que la turbina pueda suministrar potencia útil.

También se comprueba con facilidad que para velocidades bajas el sistema está muy optimizado (como era previsible, ya que a la hora de escoger esta alternativa se ha primado el buen rendimiento a velocidades bajas). Aún con velocidades inferiores al límite inferior de funcionamiento de la turbina 3,5m/s, el comportamiento de la turbina es muy positivo: con velocidades de 2m/s en adelante C_P ronda siempre el valor máximo C_{Pmax} . Sólo cuando se producen variaciones rápidas de velocidad C_P desciende hacia valores que, aún siendo inferiores al máximo, son también elevados (alrededor de 0,3), para volverse a corregir rápidamente.

11.1.4 VALORACIÓN DEL RESULTADO DE P_v , P_g Y E_g

Las potencias recogidas poseen valores muy bajos: el valor máximo de potencia del viento P_v es de 23W (se produce en el tramo 1 de la simulación), mientras que la potencia máxima detectada en el generador P_g es de tan sólo 12,5W (se produce en los tramos 1 y 7). Es natural que la potencia obtenida sea tan baja, debido a que las velocidades de viento recogidas en esta muestra son tan pequeñas que ni siquiera alcanzan el límite inferior de velocidad de funcionamiento de la turbina, 3,5m/s (el valor máximo registrado es 3,43m/s). Se supone que por debajo de dicho límite inferior no se produce potencia útil.

En las gráficas se aprecia que la potencia del viento P_v se adapta de forma muy rápida a los cambios que suceden tanto en la velocidad del viento v como en C_P (como era de esperar, ya que P_v depende de forma directa de C_P y del cubo de la velocidad v). Pero no ocurre lo mismo con la potencia en el generador P_g , cuya evolución es mucho más lenta. También esto es lógico, pues la inercia mecánica y las características magnéticas ralentizan la progresión de las variables eléctricas del generador. Cuando la potencia del viento P_v sube rápidamente, a P_g le cuesta más tiempo crecer (aunque si P_v se mantiene en valores estables P_g acaba alcanzándola una vez transcurridos unos segundos y ambas se igualan). Ocurre lo mismo cuando P_v desciende súbitamente, con la peculiaridad de que en este caso es mayor que P_v durante un transitorio de varios segundos. Esto mismo en estado permanente y con velocidad del viento constante no tendría sentido, puesto que se estaría obteniendo más potencia en el generador que en la fuente de dicha potencia, que es la turbina.

El hecho de que P_g tarde varios segundos en emular a P_v implica que el sistema sea poco eficiente cuando existen rachas de viento. Puede que en determinados momentos se produzcan velocidades de viento elevadas y el resultado de P_v sea mayor, pero si esos momentos no se prolongan lo suficiente en el tiempo los valores elevados de P_v no se traducirán en un crecimiento de la potencia en el generador P_g (que a fin de cuentas es quien alimenta la batería). Por ejemplo, imagínese que se tienen velocidades bajas

pero el viento rachea de forma puntual hacia valores más elevados (lo cuál es bastante habitual). Si dichas rachas son demasiado rápidas, el generador alimentará la batería como si la velocidad del viento se mantuviera estable en valores bajos, ignorando que la velocidad media es en realidad mayor.

La energía producida en el generador E_g a lo largo de los diez minutos es tan sólo 0,37Wh.

11.1.5 VALORACIÓN DEL RESULTADO DE I_{bat} Y SOC

El objetivo final del sistema es cargar la batería de la forma más rápida posible. Se ha visto que la turbina se comporta de forma muy positiva, con valores de coeficiente de potencia C_P muy cercanos al máximo para velocidades incluso algo por debajo del valor mínimo de velocidad de trabajo. También se ha comprobado que el funcionamiento del generador es bueno, ya que para las velocidades estudiadas la potencia en el generador P_g tiende a igualar la potencia recogida en la turbina P_v , si bien como se ha visto lo hace con un cierto retraso. Pero lo importante es que todo esto se traduzca en un ahorro en el tiempo de carga de la batería.

El problema es que con velocidades tan bajas como las registradas (inferiores a la velocidad mínima de funcionamiento de la turbina), las potencias generadas como se ha visto también son muy pequeñas, por lo que la corriente en la batería también es baja. El valor máximo de I_{bat} que se ha detectado (tramos 1 y 7) es de aproximadamente 0,95A. Los momentos en los que se producen estos valores máximos coinciden totalmente con los momentos en los que se dan los máximos de P_g , y de hecho si se estudia la evolución de ambas variables con más detalle se observa que la corriente I_{bat} calca prácticamente la progresión vivida por P_g . Esto tiene sentido si se tiene en consideración que las variaciones en la tensión de la batería U_{bat} son muy pequeñas y dependen del estado de carga (que cambia muy lentamente), por lo que las variaciones de potencia son absorbidas principalmente por la corriente.

Pero la mayor parte del tiempo los valores de I_{bat} son muy inferiores a ese valor máximo de 0,95A. De hecho, cada vez que se tienen velocidades inferiores a 1m/s (lo que ocurre durante aproximadamente 5 de los 10 minutos registrados), la corriente I_{bat} es nula. Como consecuencia, al final de esos 10 minutos el estado de carga SOC sólo se ve incrementado en un 0,1% (pasando del valor inicial 86,46% a 86,56%). Si en cada periodo de 10 minutos se produjeran siempre incrementos de SOC tan bajos, se necesitarían 1354 minutos (56 horas y media aproximadamente) para terminar de cargar completamente la batería.

11.2- VELOCIDADES DE VIENTO BAJAS SIN CONDENSADORES

A continuación se realiza la misma simulación de 10 minutos de duración con velocidades bajas, pero eliminando los condensadores de $150\mu\text{F}$ del modelo. El objetivo es comparar los resultados obtenidos con los de la simulación anterior y averiguar qué diferencias produce la introducción de condensadores en el sistema.

11.2.1 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

Los resultados obtenidos son los siguientes:

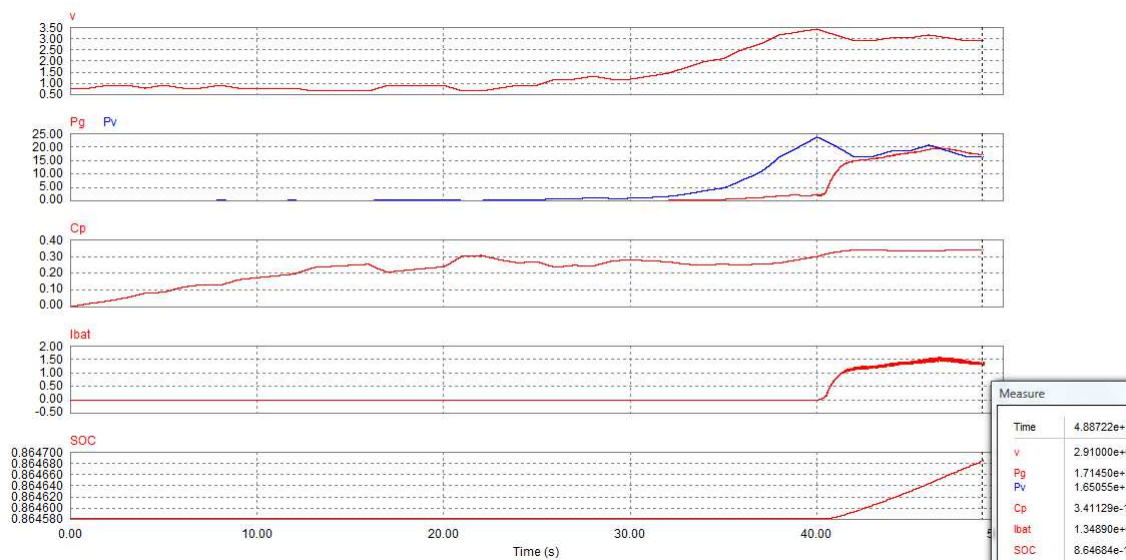


Fig 11.14: Tramo 1 de la simulación sin condensadores con velocidades bajas

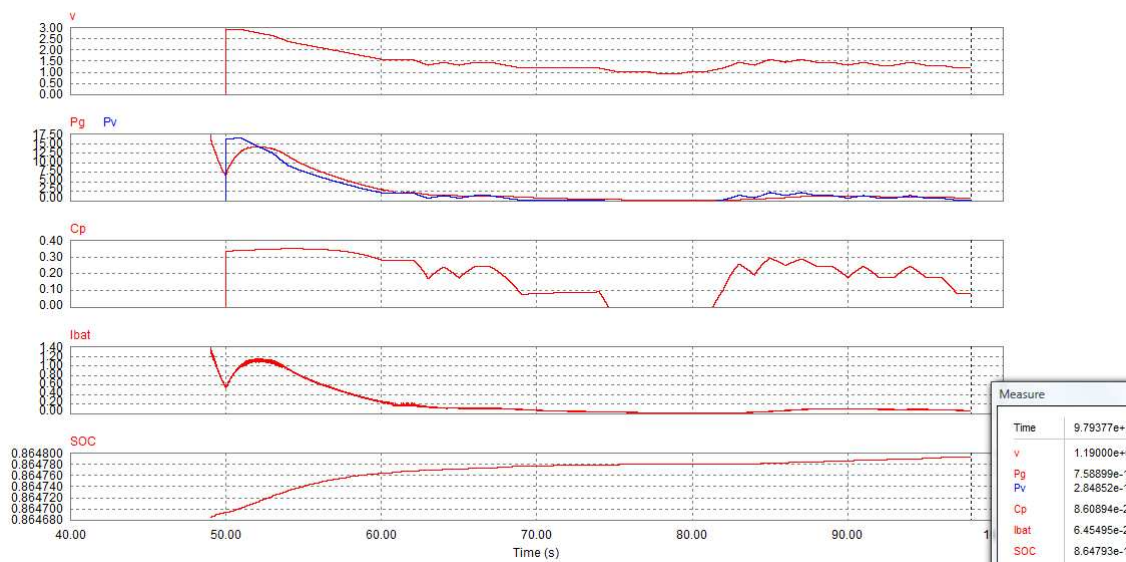


Fig 11.15: Tramo 2 de la simulación sin condensadores con velocidades bajas

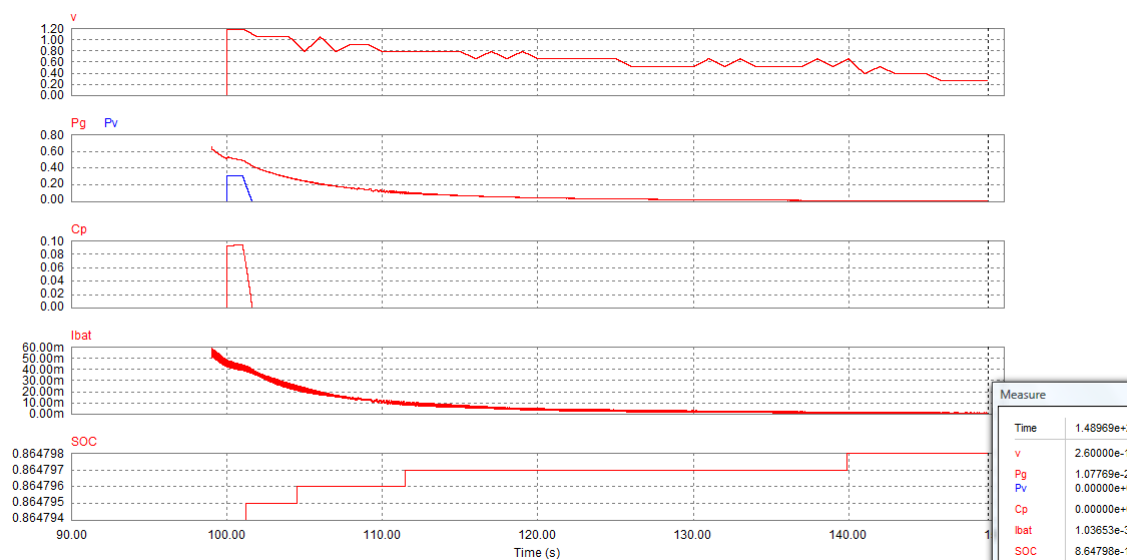


Fig 11.16: Tramo 3 de la simulación sin condensadores con velocidades bajas

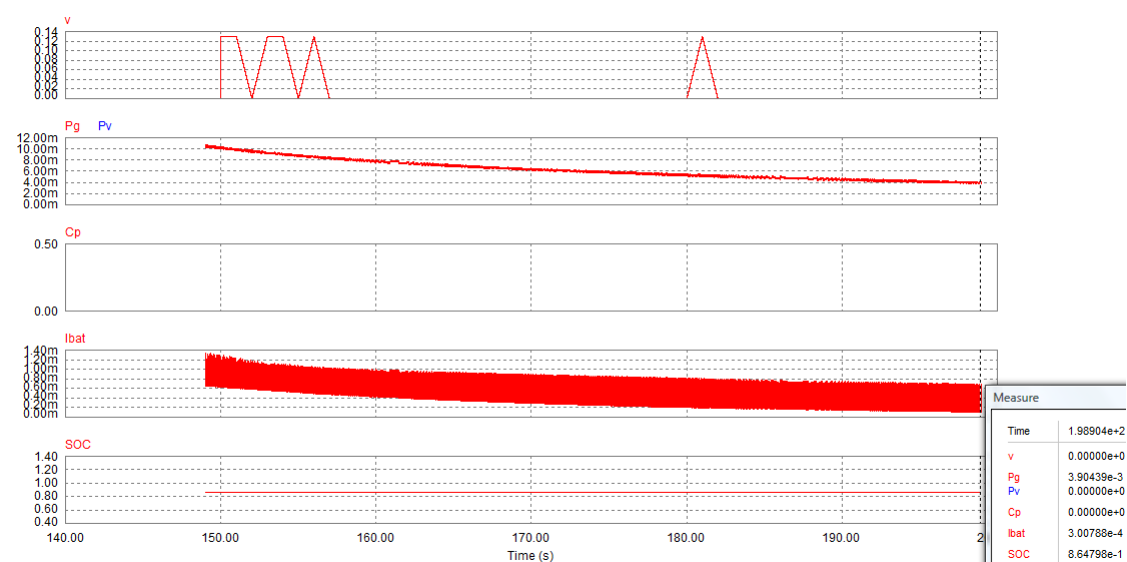


Fig 11.17: Tramo 4 de la simulación sin condensadores con velocidades bajas

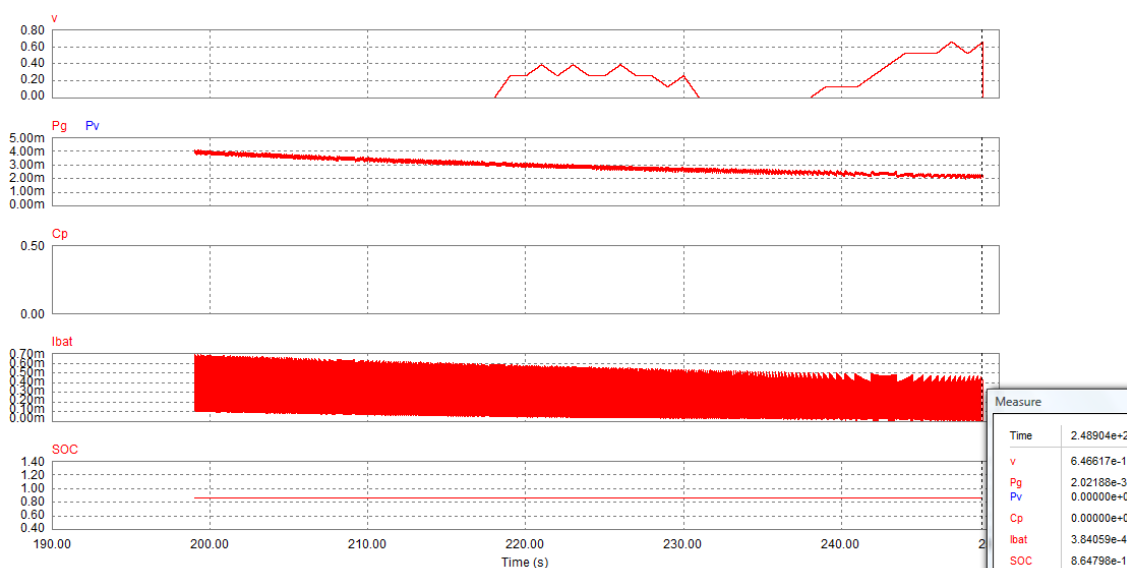


Fig 11.18: Tramo 5 de la simulación sin condensadores con velocidades bajas

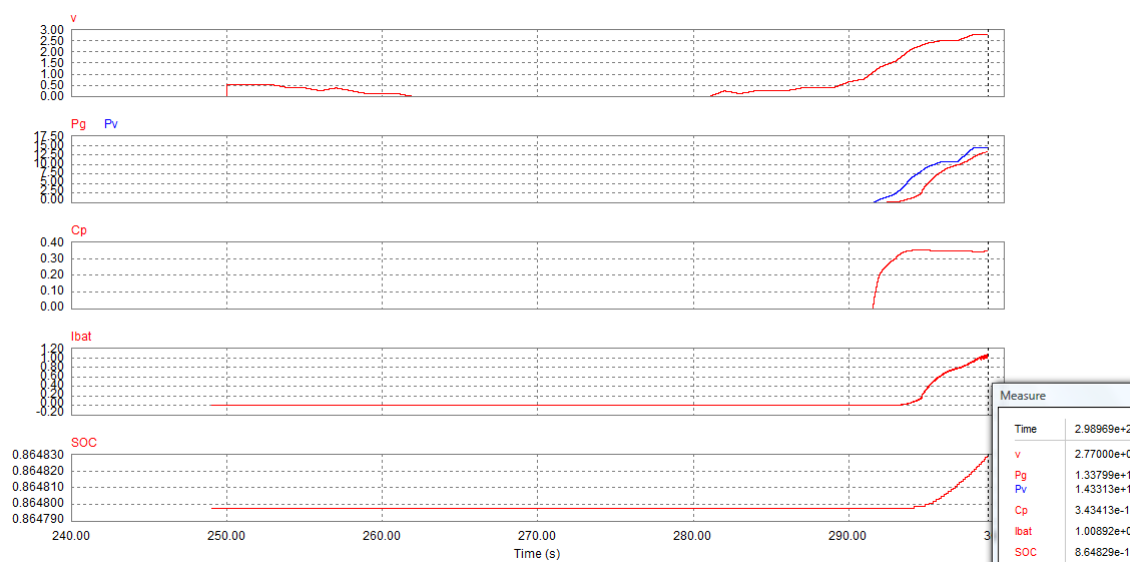


Fig 11.19: Tramo 6 de la simulación sin condensadores con velocidades bajas

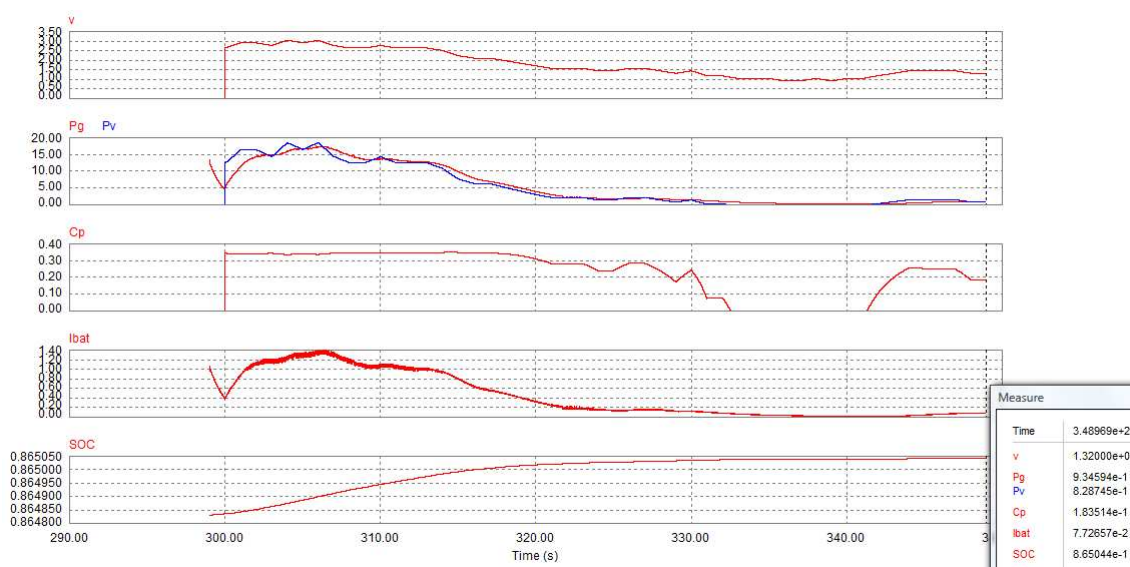


Fig 11.20: Tramo 7 de la simulación sin condensadores con velocidades bajas

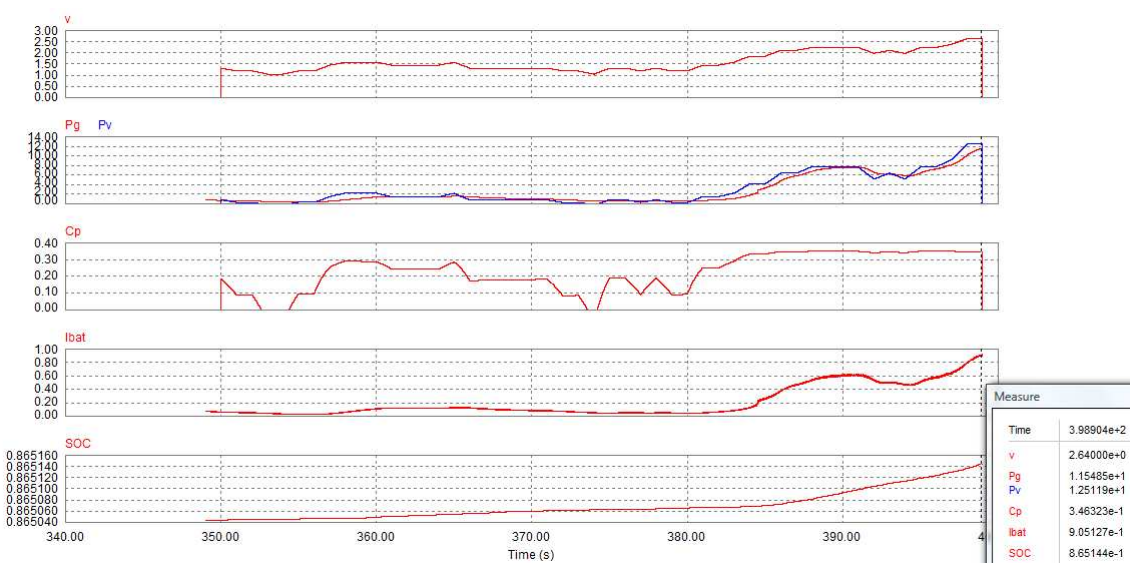


Fig 11.21: Tramo 8 de la simulación sin condensadores con velocidades bajas

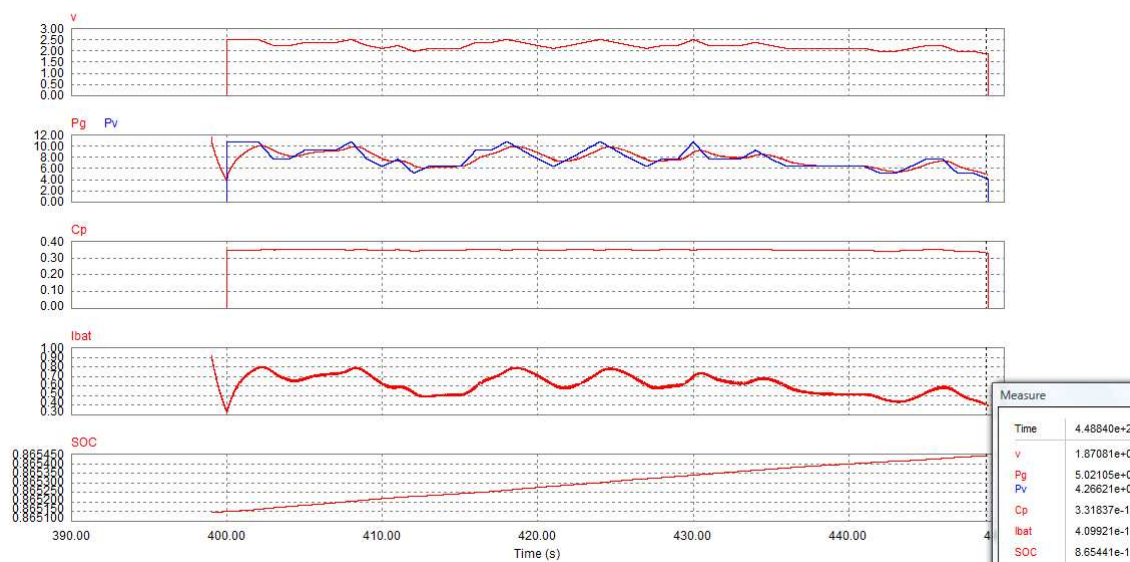


Fig 11.22: Tramo 9 de la simulación sin condensadores con velocidades bajas

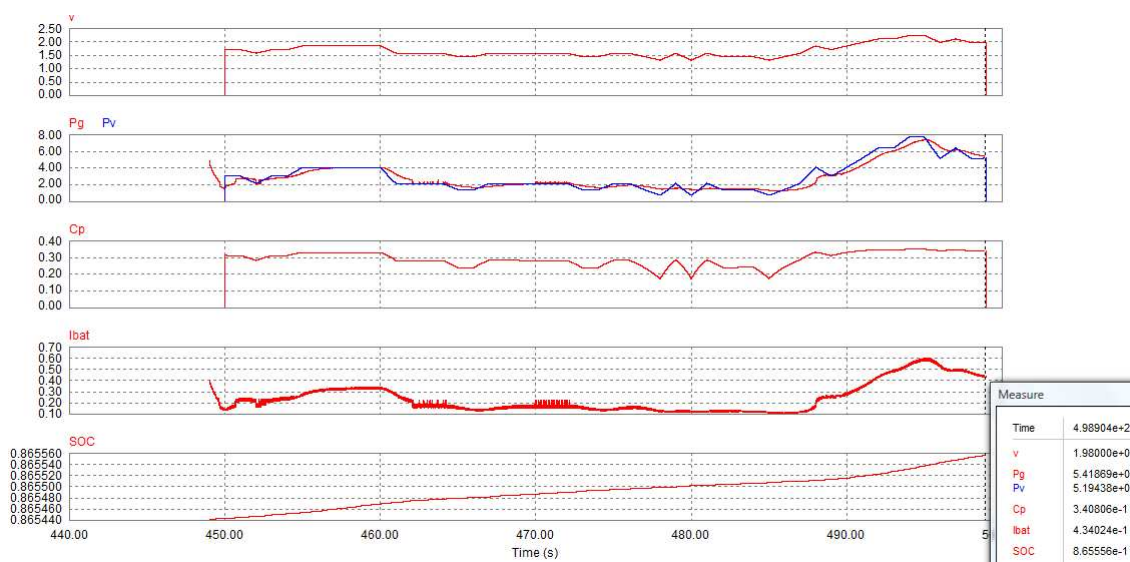


Fig 11.23: Tramo 10 de la simulación sin condensadores con velocidades bajas

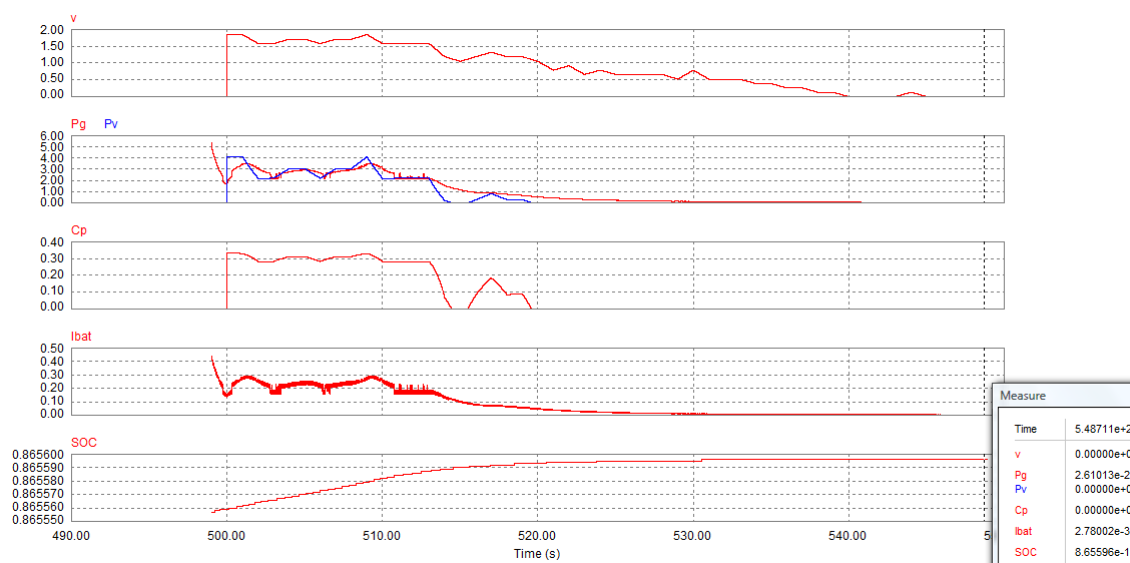


Fig 11.24: Tramo 11 de la simulación sin condensadores con velocidades bajas

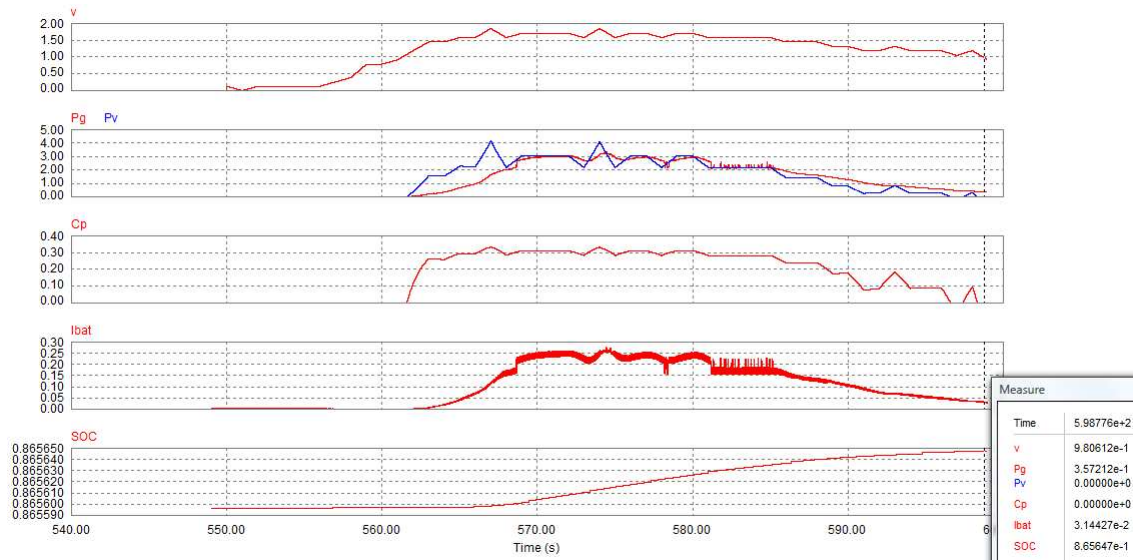


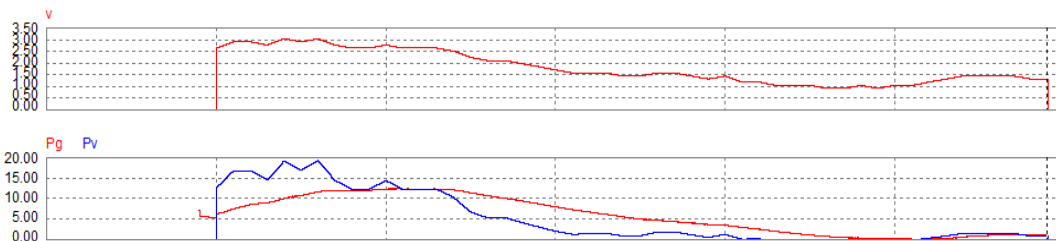
Fig 11.25: Tramo 12 de la simulación sin condensadores con velocidades bajas

11.2.2 VALORACIÓN DEL RESULTADO DE C_P

El coeficiente de potencia C_P registra valores muy similares a los obtenidos en la simulación precedente con condensadores de $150\mu\text{F}$, y de hecho prácticamente calca la evolución realizada en ese caso. Al igual que entonces, C_P ronda el valor máximo 0,35 con velocidades de viento superiores a 2m/s, y cae hasta prácticamente 0 con velocidades inferiores a 1m/s. Incluso las oscilaciones producidas durante los cambios bruscos de velocidad de viento siguen la misma forma en los dos casos. De aquí se puede deducir que la potencia del viento P_V poseerá también un comportamiento muy similar, ya que ésta depende del cubo de la velocidad (la misma para las dos simulaciones) y del coeficiente de potencia.

11.2.3 VALORACIÓN DEL RESULTADO DE P_V , P_g Y E_g

Efectivamente, la potencia del viento P_V sigue prácticamente la misma forma que en la simulación con condensadores. Sin embargo, la potencia en el generador P_g varía ligeramente su comportamiento. En esta simulación se aprecia también que la evolución de P_g es más lenta que la de P_V , pero dicha evolución es más rápida que la que se ha visto en la simulación con condensadores. Este hecho se aprecia claramente en el tramo 10 (mostrado para ambas simulaciones en las figuras 12.26 y 12.27):

Fig 11.26: Evolución de P_V y P_g a lo largo del tramo 10 de la simulación con $C = 150\mu\text{F}$

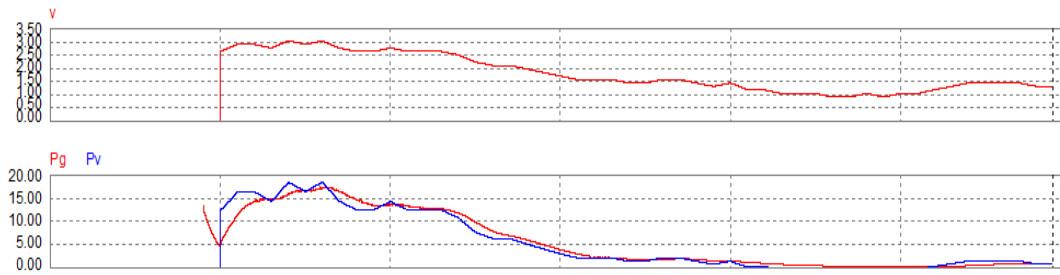


Fig 11.27: Evolución de P_v y P_g a lo largo del tramo 10 de la simulación sin condensadores

Como puede apreciarse, el mayor retardo de P_g cuando se emplean condensadores (figura 11.26) hace que se produzca una pérdida de potencia en los instantes en los que P_v crece con rapidez, como ocurre al inicio de este tramo 10. La simulación sin condensadores de la figura 11.27 muestra como en esa subida P_g se ciñe mejor a la curva de P_v , obteniendo valores más elevados que los de la simulación con condensadores.

Sin embargo, este mismo retardo se convierte en un beneficio cuando P_v y la velocidad del viento v descienden, pues el transitorio a lo largo del cual la potencia en el generador P_g supera a P_v tiene una mayor duración, manteniendo los valores elevados de potencia durante más tiempo.

En definitiva, el mayor retardo cuando se emplean condensadores no parece que vaya a alterar excesivamente los resultados, pues la pérdida de potencia en las subidas de velocidad se compensa con la potencia ganada en las bajadas. Esto se confirma si se observa la potencia total generada al final de los 10 minutos, que es de 0,37Wh, la misma que la producida en la simulación con condensadores de 150 μ F.

Los datos de ambas simulaciones concuerdan además con los resultados obtenidos con velocidades constantes en el apartado *Ajustes del sistema*. Para velocidades bajas (la velocidad estudiada era $v = 4$ m/s constante), las dos combinaciones ($RT=10, C=0$; y $RT=10, C=150\mu F$) ofrecían buenos resultados, si bien el resultado de P_g era ligeramente superior si se empleaban condensadores ($P_g=43,3W$ frente a 39,6W).

11.2.4 VALORACIÓN DEL RESULTADO DE I_{bat} Y SOC

Como era de esperar, los valores obtenidos de I_{bat} sin utilizar condensadores son también similares a los que se producían al utilizarlos, aunque el menor retardo de P_g también se traslada a esta variable. Esto produce que cuando la velocidad se incrementa se alcancen picos de corriente más elevados (de hasta 1,5A frente a los 0,95A máximos que se obtenían con condensadores). Sin embargo, también los descensos son más acusados cuando la velocidad se reduce. En general, puede decirse que los valores medios son similares en ambos casos, pero la corriente de carga de la batería fluctúa más fuertemente si no se utilizan condensadores.

El estado de carga SOC se ve incrementado en un 0,1% (desde 86,46% hasta 86,56%), exactamente el mismo porcentaje que con condensadores de 150 μ F.

11.3- VELOCIDADES VIENTO ALTAS CON $RT = 10$ Y $C = 150\mu F$

11.3.1 ANÁLISIS DE LAS VELOCIDADES REGISTRADAS

Para obtener datos a velocidades altas, simplemente se emplea de nuevo el registro de datos diezminutal anterior y se le ha añadido a todos los valores un offset de 8m/s, con lo que los valores oscilan entre 8m/s y 11,43m/s.

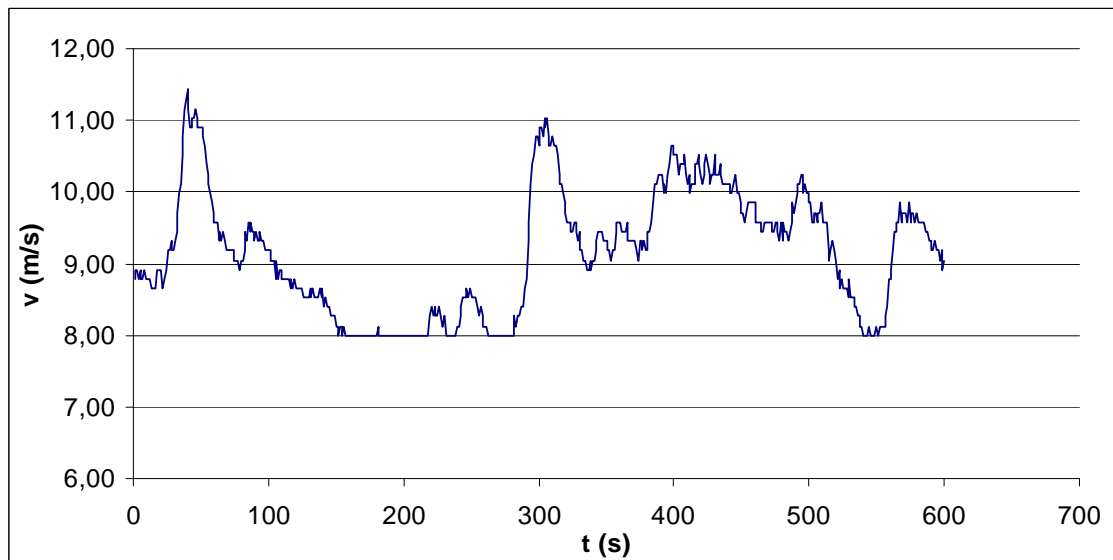


Fig 11.28: Evolución de la velocidad del viento v en el tiempo con offset de 8m/s

11.3.2 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

A continuación se muestran los resultados divididos en tramos de 50 segundos:

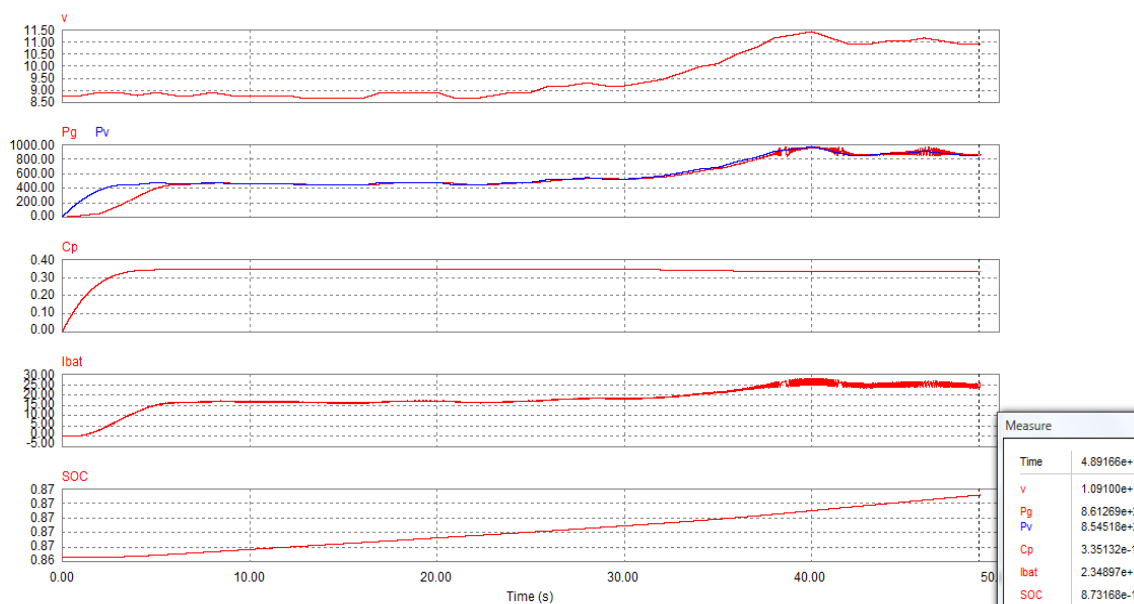
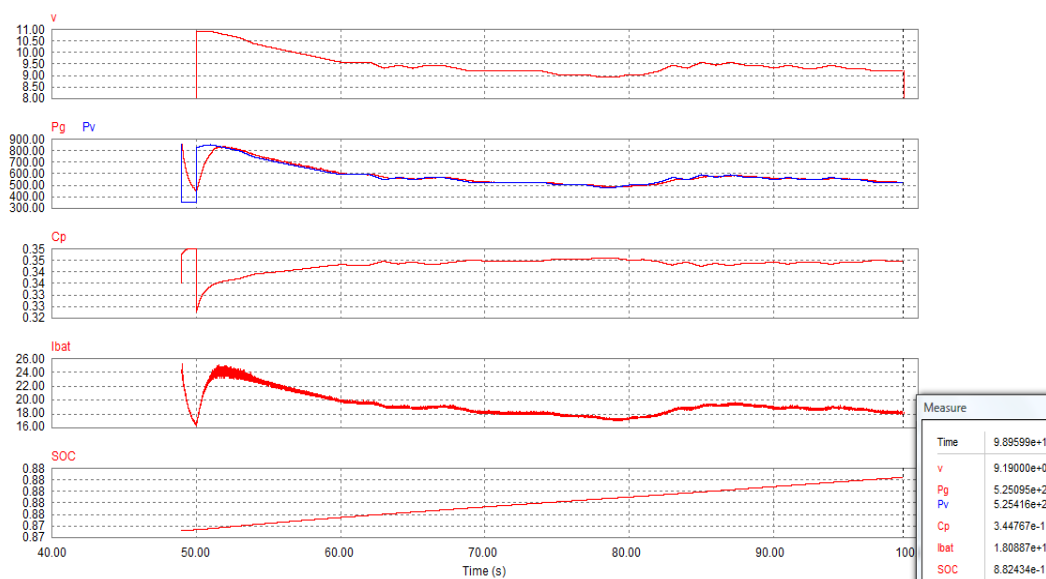
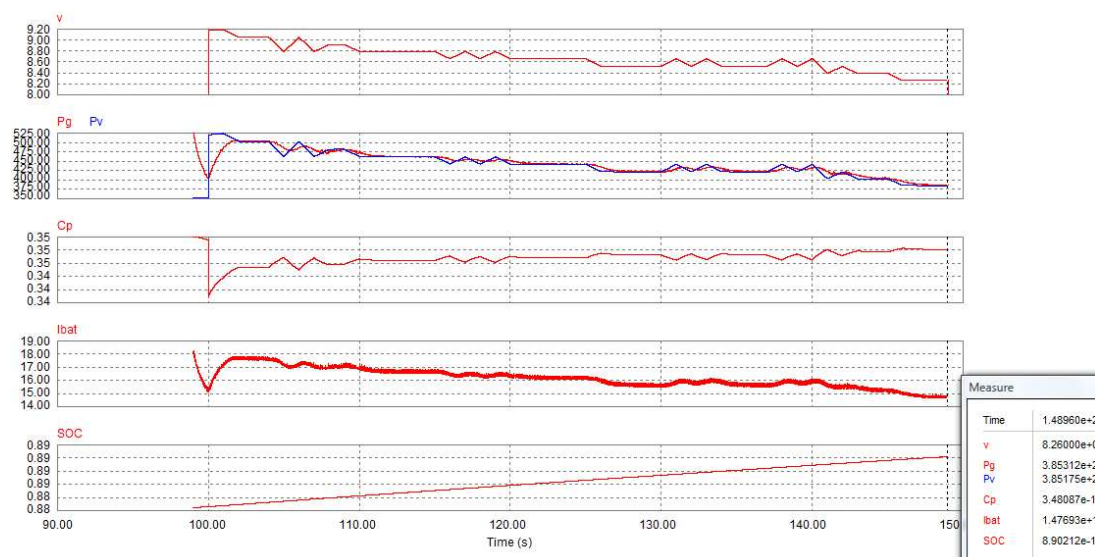
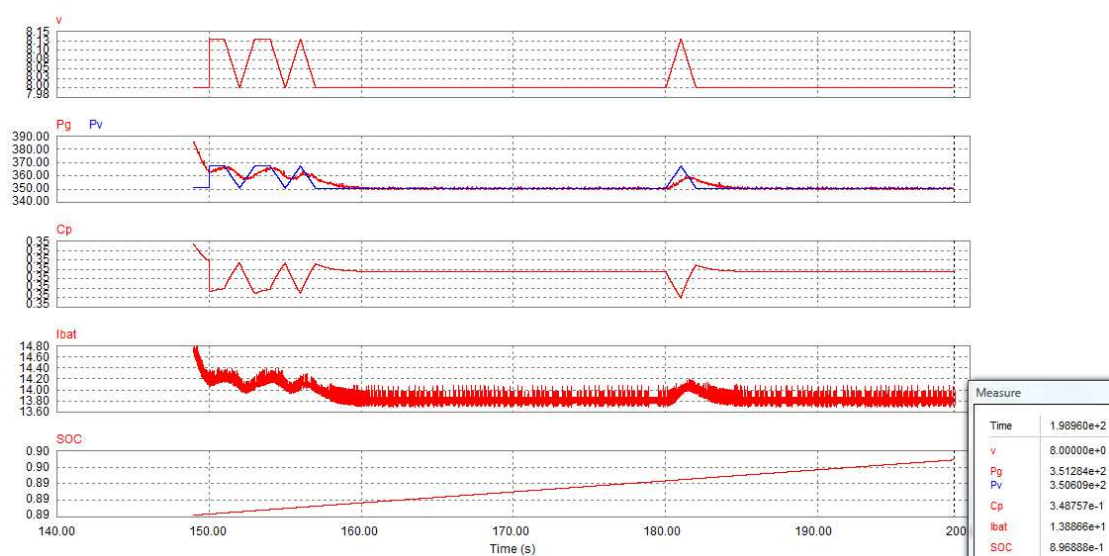
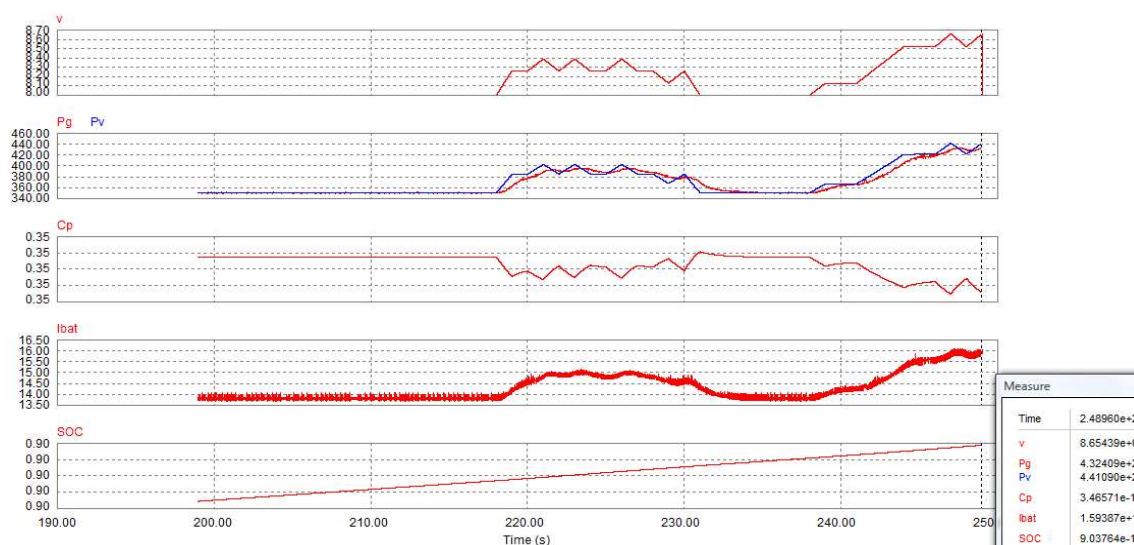
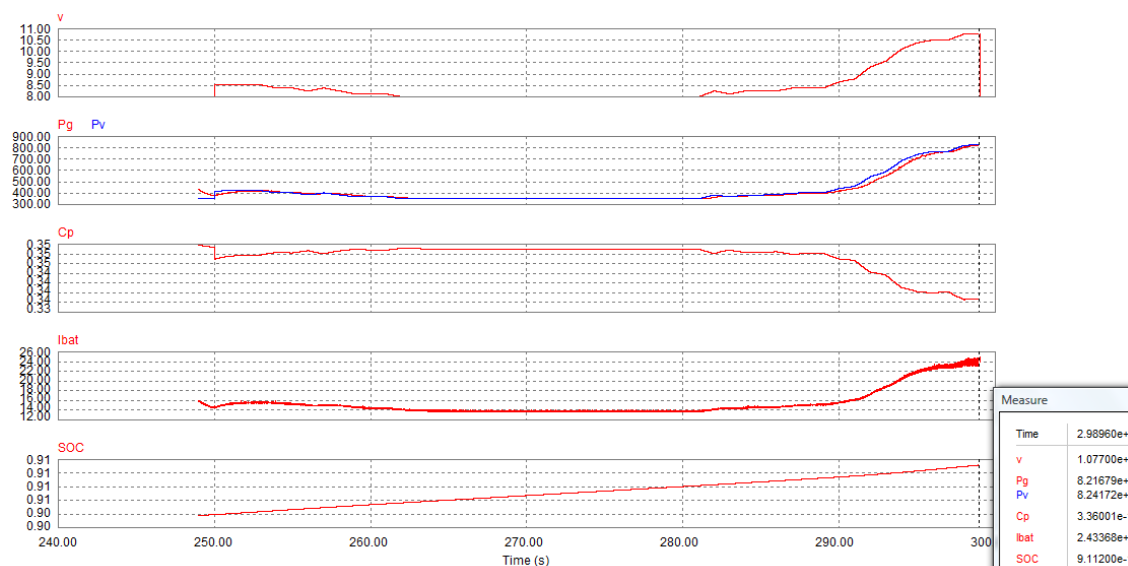
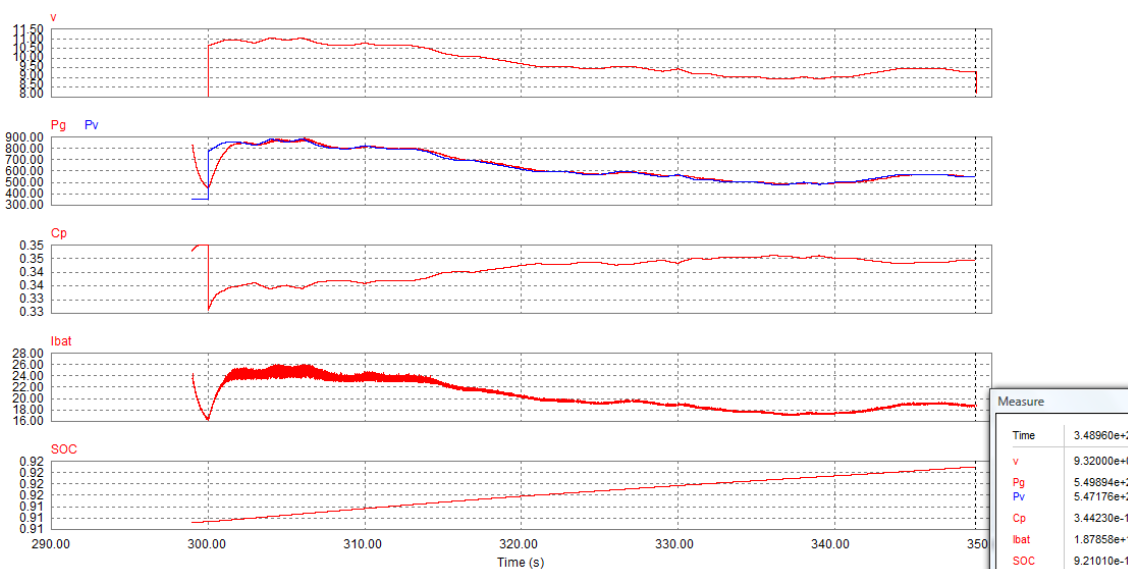
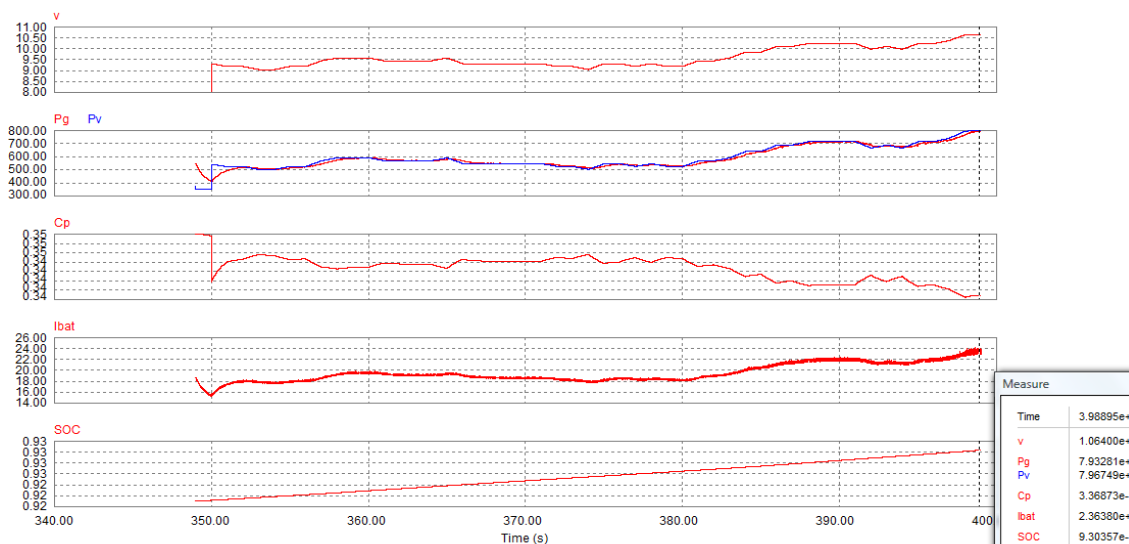
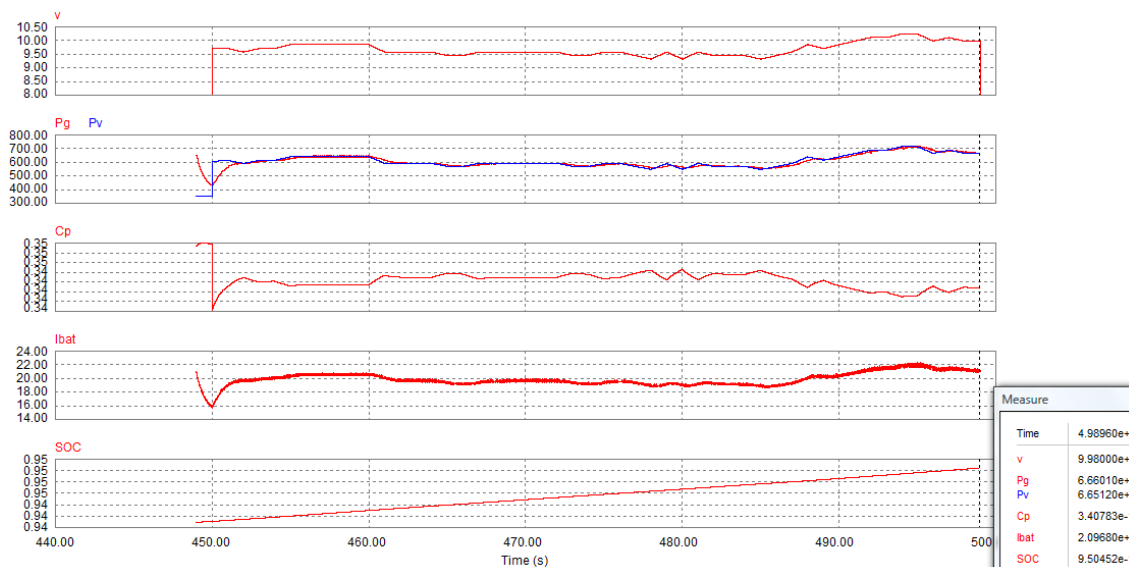
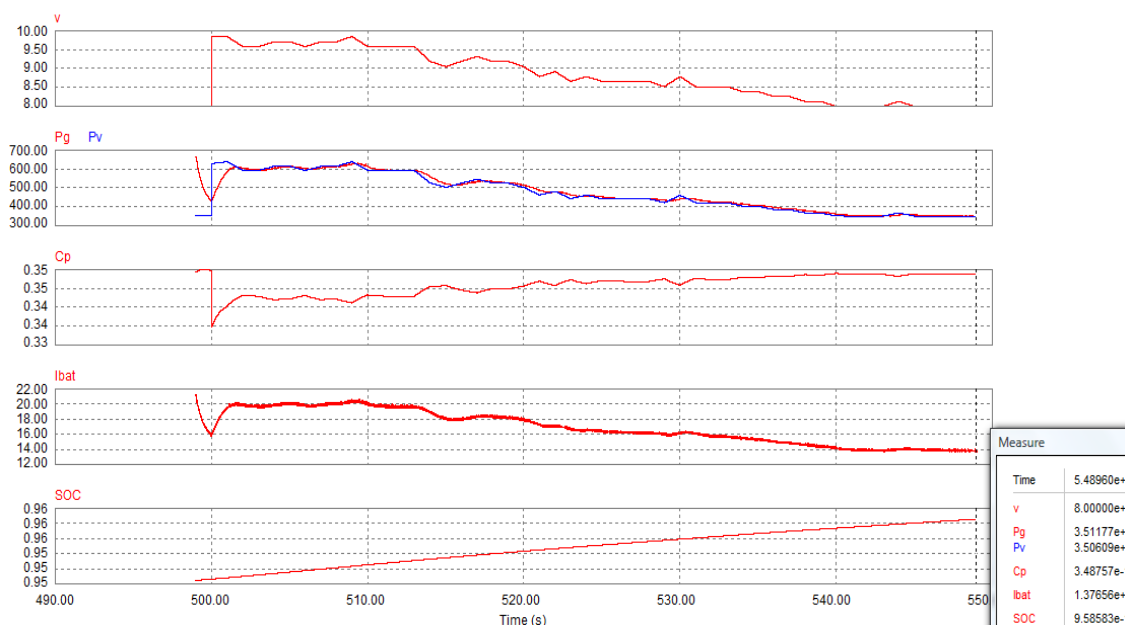
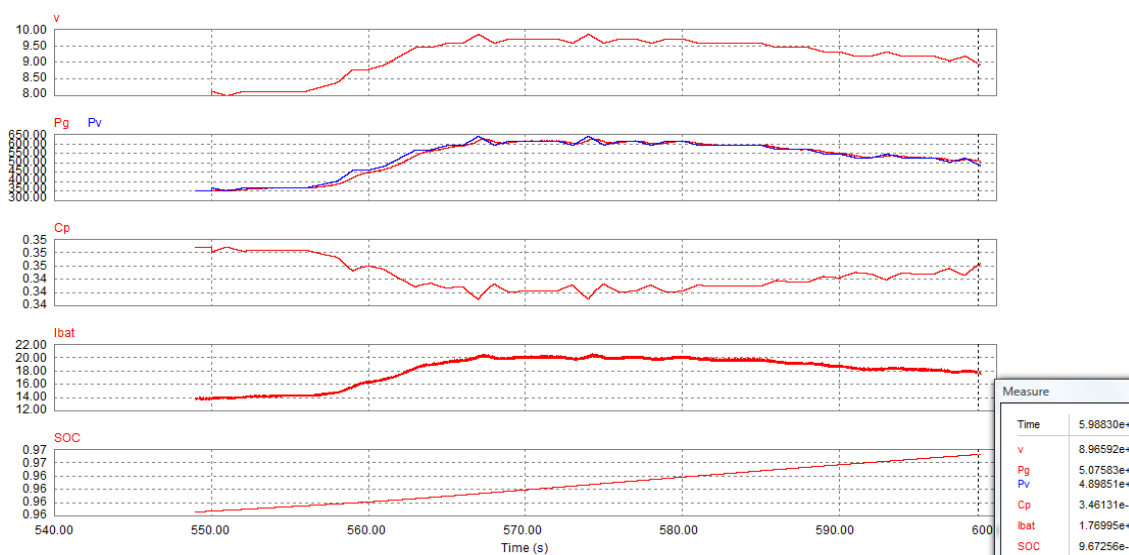


Fig 11.29: v , P_g , P_v , C_p , I_{bat} y SOC obtenidos durante el tramo 1 de la simulación con v altas

Fig 11.30: v , P_g , P_v , C_p , I_{bat} y SOC obtenidos durante el tramo 2 de la simulación con v altasFig 11.31: v , P_g , P_v , C_p , I_{bat} y SOC obtenidos durante el tramo 3 de la simulación con v altasFig 11.32: v , P_g , P_v , C_p , I_{bat} y SOC obtenidos durante el tramo 4 de la simulación con v altas

Fig 11.33: v , P_g , P_v , C_p , I_{bat} y SOC obtenidos durante el tramo 5 de la simulación con v altasFig 11.34: v , P_g , P_v , C_p , I_{bat} y SOC obtenidos durante el tramo 6 de la simulación con v altasFig 11.35: v , P_g , P_v , C_p , I_{bat} y SOC obtenidos durante el tramo 7 de la simulación con v altas

Fig 11.36: v , P_g , P_v , C_p , I_{bat} y SOC obtenidos durante el tramo 8 de la simulación con v altasFig 11.37: v , P_g , P_v , C_p , I_{bat} y SOC obtenidos durante el tramo 9 de la simulación con v altasFig 11.38: v , P_g , P_v , C_p , I_{bat} y SOC obtenidos durante el tramo 10 de la simulación con v altas

Fig 11.39: v , P_g , P_v , C_p , I_{bat} y SOC obtenidos durante el tramo 11 de la simulación con v altasFig 11.40: v , P_g , P_v , C_p , I_{bat} y SOC obtenidos durante el tramo 12 de la simulación con v altas

11.3.3 VALORACIÓN DEL RESULTADO DE C_p

C_p pasa de cero a aproximadamente $C_{p_{max}}$ (0,35) en los primeros 5 segundos de simulación. Desde entonces se mantiene alrededor del valor máximo, y sólo se producen pequeñas oscilaciones con las variaciones de velocidad de viento. Como consecuencia de esas oscilaciones C_p desciende ligeramente, aunque en ningún caso es inferior a 0,325. Por lo tanto, el rendimiento de la turbina está muy optimizado también para velocidades de viento elevadas.

11.3.4 VALORACIÓN DEL RESULTADO DE P_v , P_g Y E_g

C_P es prácticamente idéntico a C_{Pmax} a lo largo de toda la simulación. Puesto que la potencia del viento P_v se modifica de forma instantánea con los cambios de v y C_P , P_v posee en todo momento el valor máximo posible correspondiente a cada valor de v . El pico de P_v (985W) se produce en el segundo 40.

En este caso P_g también progresa de forma más lenta que P_v , como ocurría con velocidades bajas. Pero en este caso la evolución es mucho más rápida que antes. Se puede concluir que la velocidad de reacción de P_g es mayor conforme aumenta la velocidad de funcionamiento del generador. La energía producida en el generador E_g es en este caso de 87,02Wh.

11.3.5 VALORACIÓN DEL RESULTADO DE I_{bat} Y SOC

La corriente I_{bat} varía entre 13,7A y 27A. La evolución de la corriente depende en este caso de forma muy directa de la velocidad del viento v , debido a que el rendimiento C_P es prácticamente constante y la potencia en el generador P_g sigue con bastante rapidez las variaciones de la potencia del viento P_v . Puesto que los valores elevados de corriente se mantienen a lo largo de toda la simulación, el estado de carga SOC aumenta considerablemente y de forma sostenida durante los diez minutos. Al final de ese periodo se ha incrementado un 10,27% (de 86,46% a 96,73%).

11.4- VELOCIDADES DE VIENTO ALTAS SIN CONDENSADORES

Al igual que como se ha hecho con las velocidades bajas, a continuación se realiza una nueva simulación con velocidades altas y sin condensadores. El objetivo es de nuevo comparar los resultados obtenidos con los de la simulación anterior y averiguar qué diferencias produce la introducción de condensadores en el sistema.

11.4.1 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

Los resultados obtenidos son los siguientes:

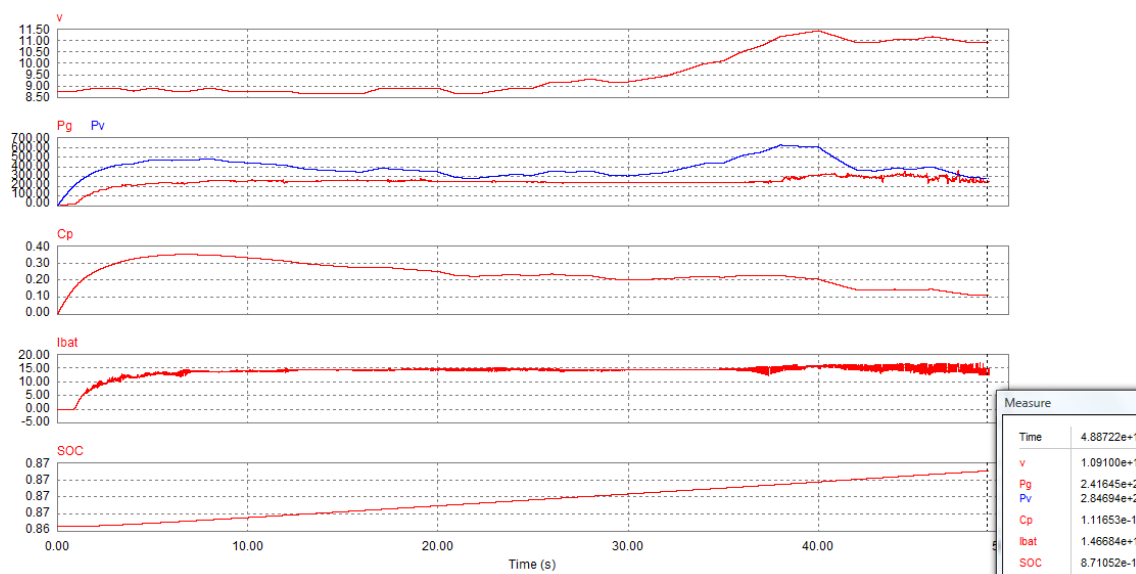


Fig 11.41: Tramo 1 de la simulación sin condensadores con velocidades altas

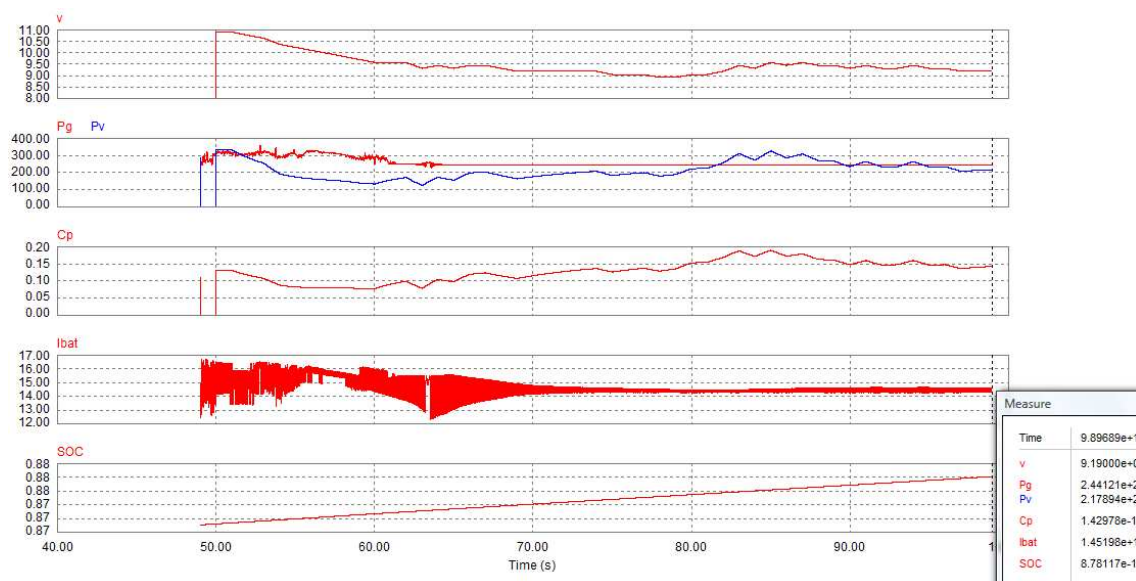


Fig 11.42: Tramo 2 de la simulación sin condensadores con velocidades altas

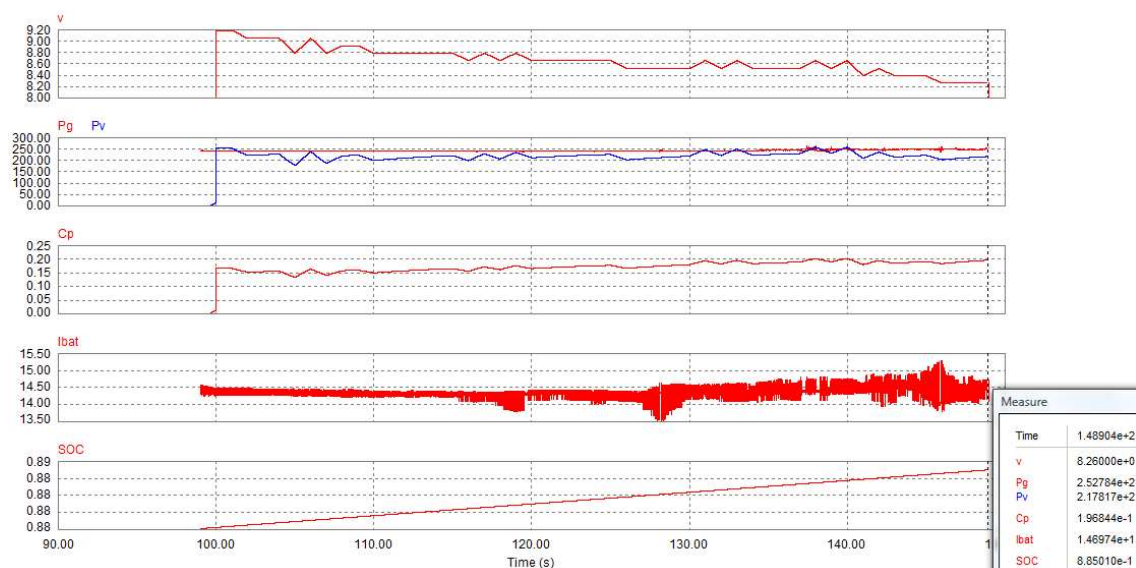


Fig 11.43: Tramo 3 de la simulación sin condensadores con velocidades altas

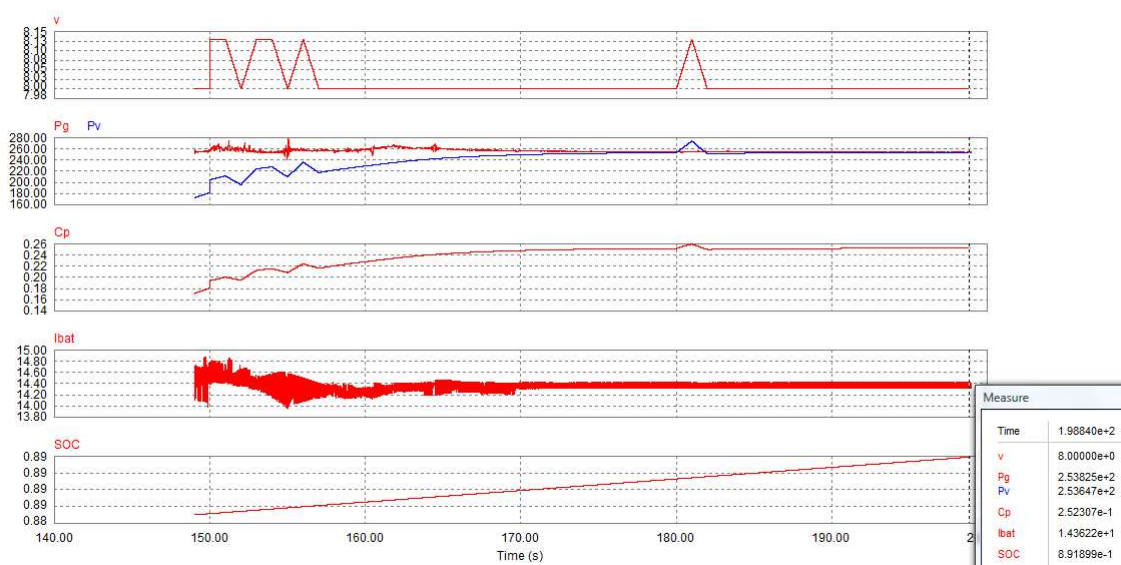


Fig 11.44: Tramo 4 de la simulación sin condensadores con velocidades altas

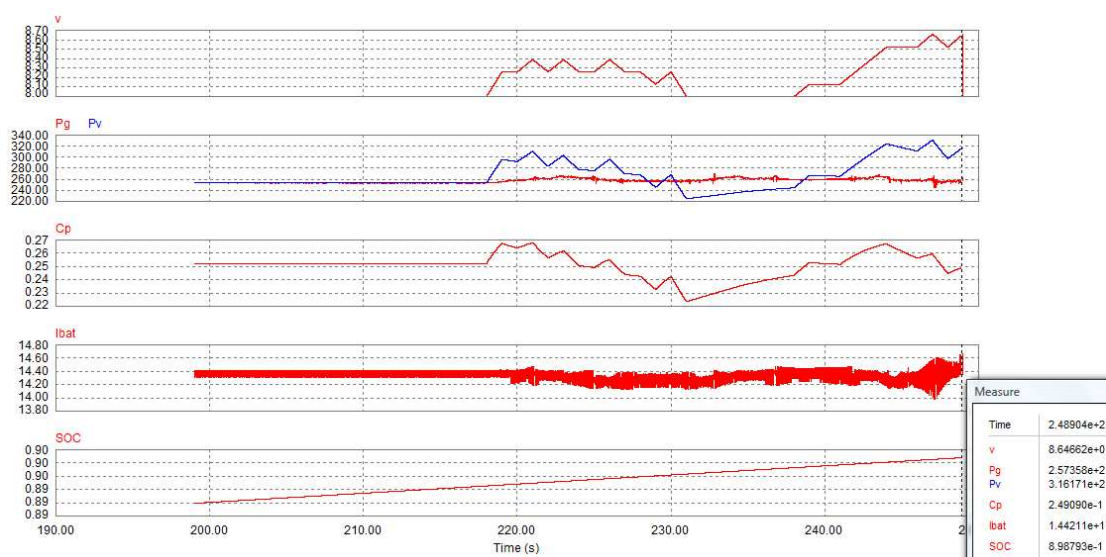


Fig 11.45: Tramo 5 de la simulación sin condensadores con velocidades altas

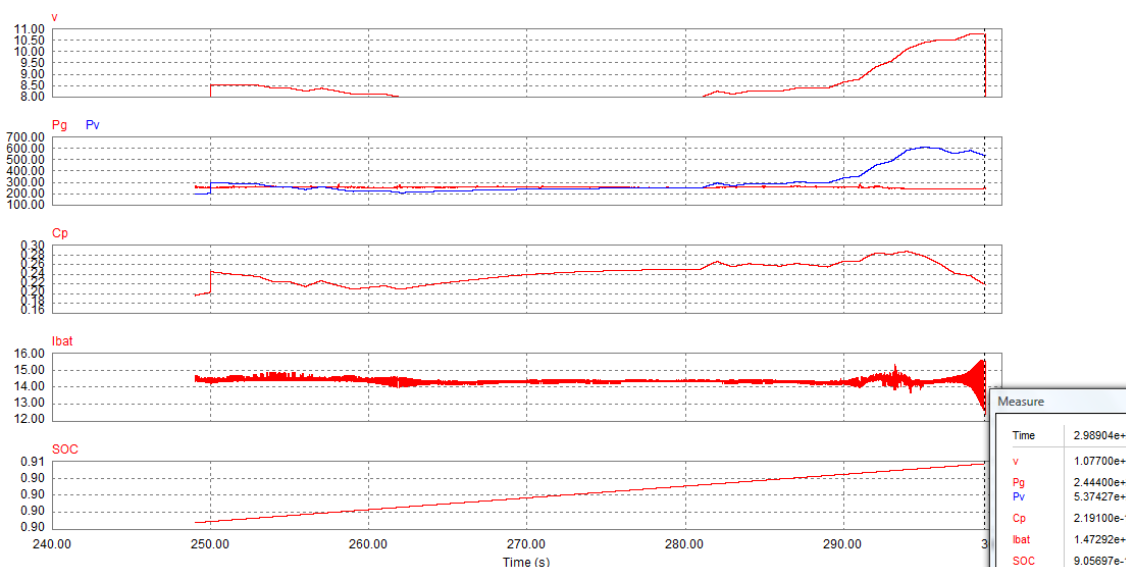


Fig 11.46: Tramo 6 de la simulación sin condensadores con velocidades altas

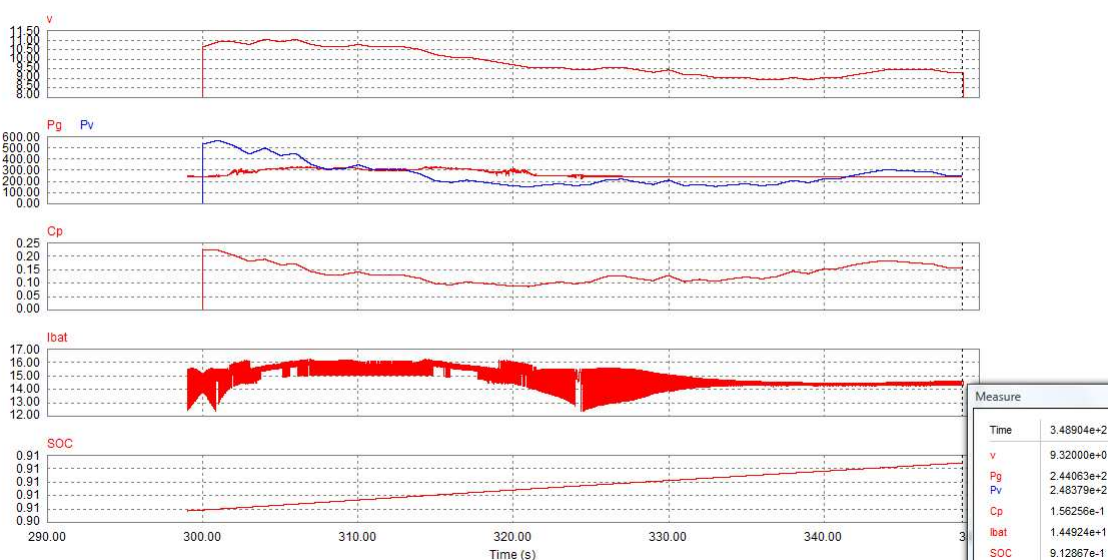


Fig 11.47: Tramo 7 de la simulación sin condensadores con velocidades altas

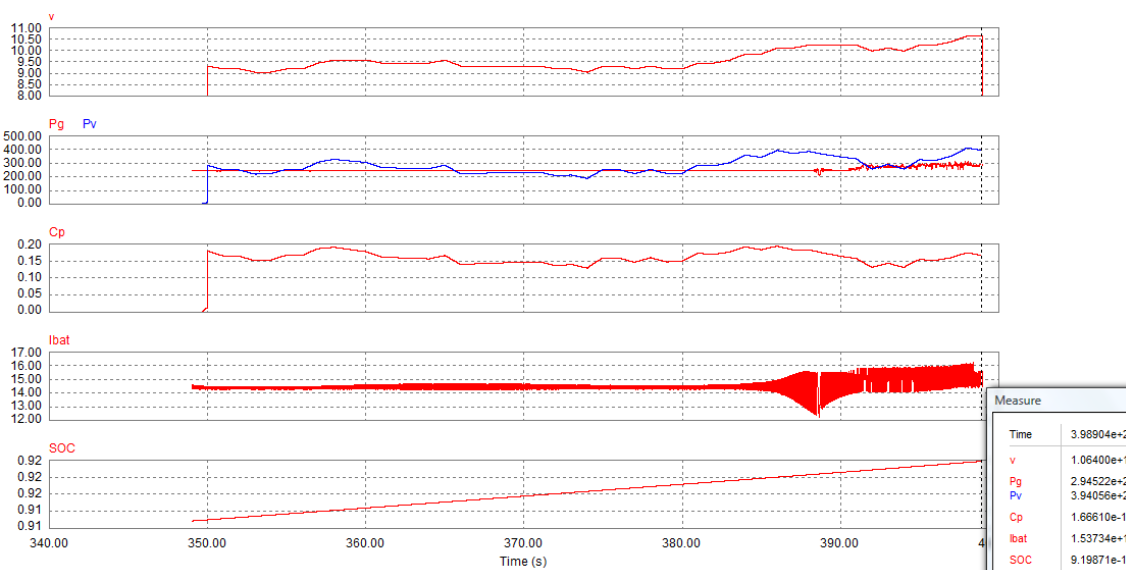


Fig 11.48: Tramo 8 de la simulación sin condensadores con velocidades altas

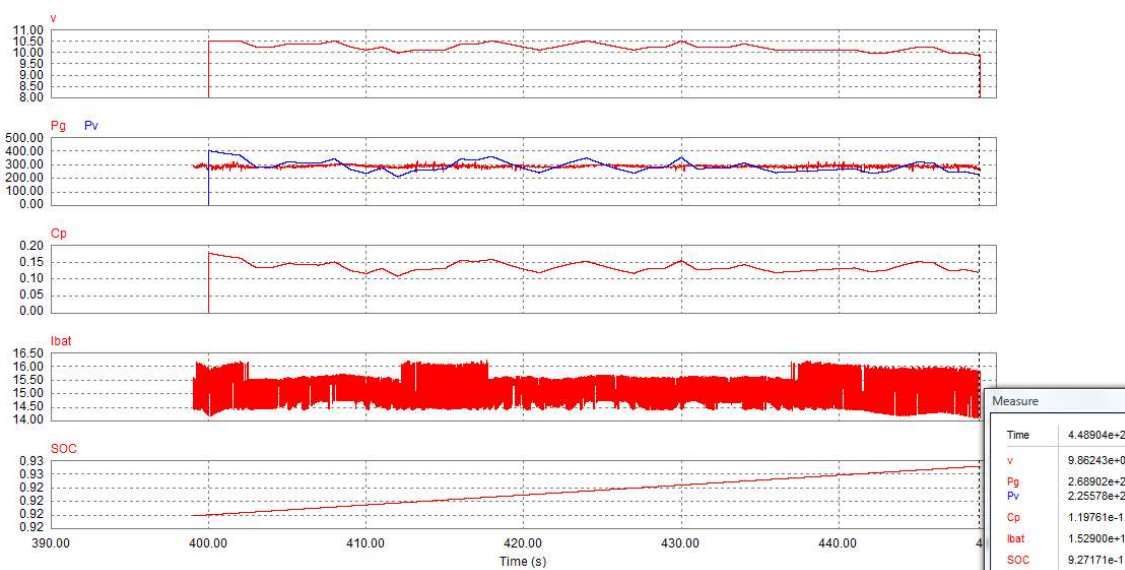


Fig 11.49: Tramo 9 de la simulación sin condensadores con velocidades altas

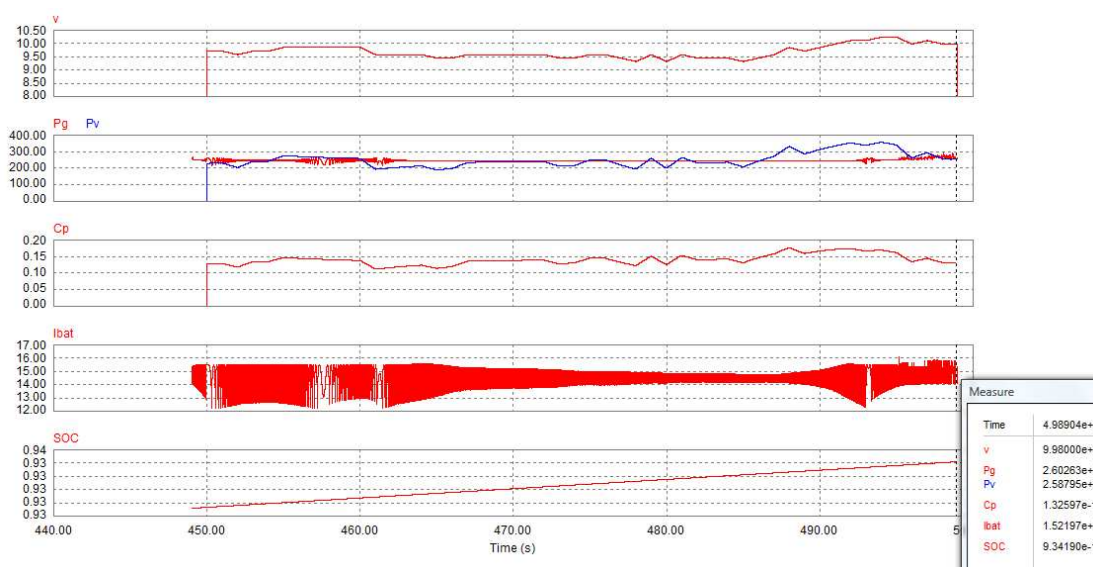


Fig 11.50: Tramo 10 de la simulación sin condensadores con velocidades altas

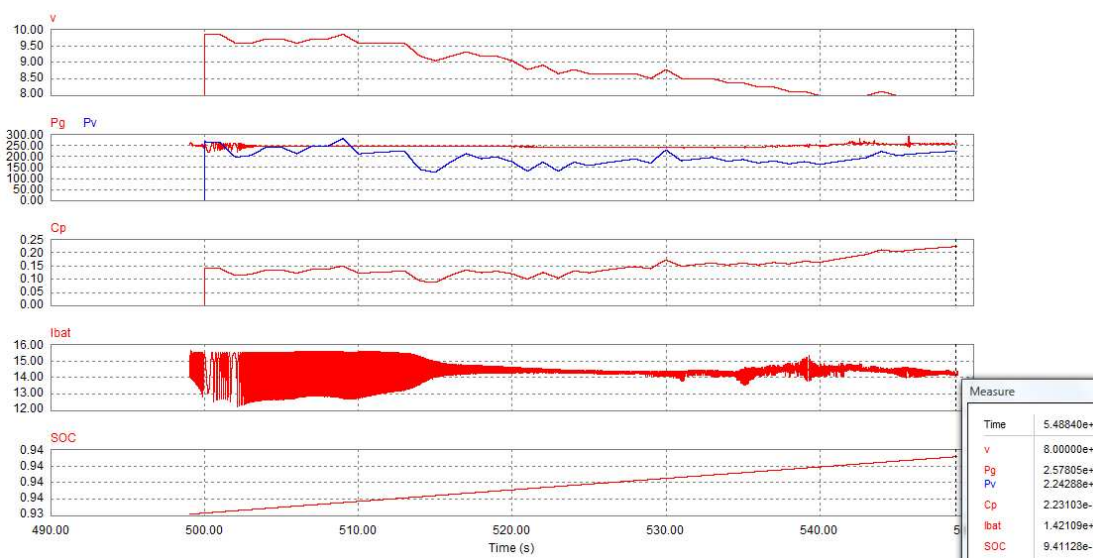


Fig 11.51: Tramo 11 de la simulación sin condensadores con velocidades altas

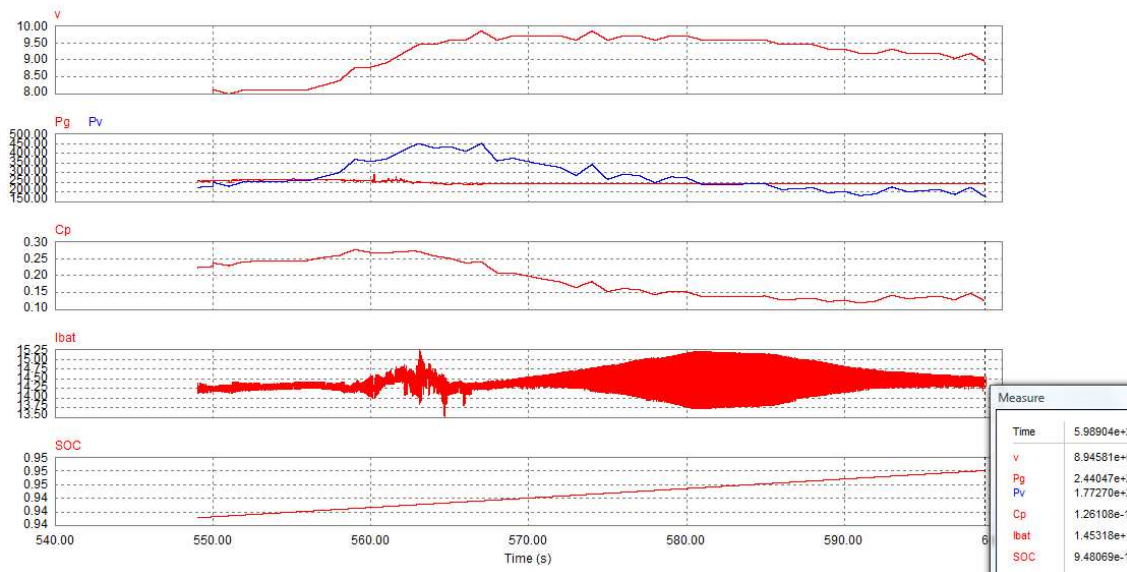


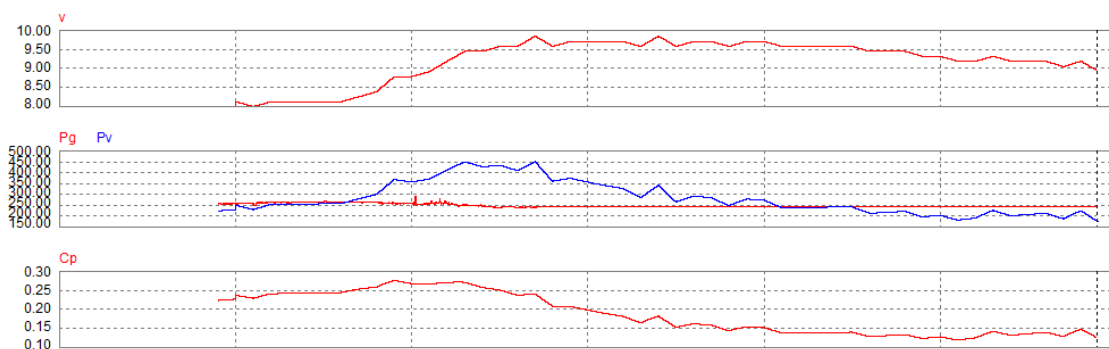
Fig 11.52: Tramo 12 de la simulación sin condensadores con velocidades altas

11.4.2 VALORACIÓN DEL RESULTADO DE C_p

Aproximadamente a los 5 segundos de comenzar la simulación C_p pasa puntualmente por C_{pmax} (0,35). Desde entonces en adelante desciende a valores muy inferiores, y aumenta y disminuye lentamente a lo largo de toda la simulación, aunque sin que se produzcan oscilaciones bruscas como las que ocurrían con velocidades muy bajas. Después de pasar en los segundos iniciales por el valor máximo, C_p fluctúa entre 0,08 y 0,28. Tiende hacia valores inferiores de ese rango cuando aumenta la velocidad, y viceversa.

11.4.3 VALORACIÓN DEL RESULTADO DE P_v , P_g y E_g

Debido a los bajos valores de C_p , la potencia del viento P_v posee valores bastante inferiores a los obtenidos en la simulación con condensadores. El valor máximo es de 608W, frente a los 985W registrados en el segundo 40 de la simulación con condensadores. En general cuando la velocidad del viento v aumenta el coeficiente de potencia C_p disminuye, de modo que en algunos casos con velocidades mayores se obtienen menores potencias P_v (por ejemplo, en el tramo 12 representado en la figura 11.53).

Fig 11.53: Valores de v , C_p , P_v y P_g obtenidos en el tramo 12

P_g posee evidentemente valores inferiores a los que adquiriría en la simulación con condensadores, pero existe además otra diferencia importante con respecto a ese caso anterior. En la simulación sin condensadores el retardo que posee P_g aumenta considerablemente, hasta el punto de que esta variable se mantiene prácticamente constante y parece muchas veces insensible a las variaciones de P_v , como si al potencia en el generador P_g estuviera filtrada (también esto se puede apreciar en la figura 11.53).

La energía en el generador E_g producida hasta el final de la simulación es también menor, 42,59Wh frente a los 87,02Wh producidos en el caso anterior.

11.4.4 VALORACIÓN DEL RESULTADO DE I_{bat} Y SOC

Debido a la reducción producida en la potencia del generador P_g , también la corriente en la batería I_{bat} desciende. En consecuencia, al final de la simulación el estado de carga SOC alcanza un valor de 94,81%, inferior a la carga de 96,73% alcanzada con condensadores. En total, la batería se ha cargado un 8,35%.

12- CONCLUSIONES GENERALES

Los resultados obtenidos con cada una de las simulaciones del apartado 11 *Simulaciones con viento real* se muestran en la figura 12.1:

Velocidades	Condensadores	incremento de SOC	E _g
bajas	150uF	0,1%	0,37Wh
	NO	0,1%	0,37Wh
altas	150uF	10,27%	87,02Wh
	NO	8,35%	42,59Wh

Fig 12.1: Valores de SOC y E_g obtenidos en cada simulación

Los resultados de las simulaciones con velocidades de viento bajas son bastante insatisfactorios, ya que la batería apenas se ha cargado nada, mientras que la energía producida en el generador durante esos 10 minutos es de tan sólo 0,37Wh. Pero tampoco se podía esperar más con unas velocidades de viento tan bajas que ni siquiera llegan a superar el valor mínimo de trabajo de la turbina. Sin embargo, en esas simulaciones también se aprecia que C_P y P_g evolucionan siempre hacia sus valores máximos (salvo que v sea prácticamente nula). Por lo tanto, a pesar de que la ausencia de viento se traduce en que en algunos momentos no se carga la batería, se puede deducir que el sistema está bien optimizado para velocidades bajas (incluso para velocidades algo inferiores al mínimo valor de funcionamiento de la turbina).

El resultado correspondiente a la simulación con velocidades de viento bajas y sin condensadores es exactamente el mismo que con condensadores. Este hecho cobra sentido si se observan los resultados de potencia en el generador obtenidos con velocidades constantes en el apartado 10 *Ajuste del sistema*:

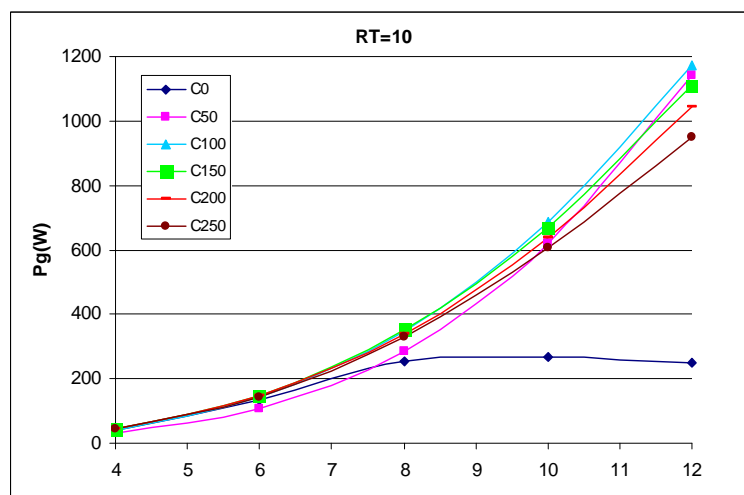


Fig 12.2: Valores de P_g obtenidos en con $RT=10$ y velocidades de viento constantes

Los condensadores permiten aumentar la potencia generada para velocidades elevadas, pero por debajo de 6m/s no se aprecian diferencias entre los resultados producidos empleando condensadores y sin hacerlo, debido a que la

reactancia síncrona a compensar es menor. Las simulaciones con velocidades bajas poseen un valor máximo de velocidad del viento de tan sólo 3,43m/s, por lo que no llegan a alcanzar la zona susceptible de mejora.

A velocidades altas también se confirma que empleando condensadores se hace funcionar a la turbina y al generador de forma óptima, puesto que C_p y P_g se sitúan siempre en los valores máximos. Pero además, los elevados valores de velocidad del viento sí se traducen en este caso en una corriente elevada, lo cual permite que la batería se cargue un 10,27% en tan sólo 10 minutos. La energía que se ha producido en este caso en el generador es 87,01Wh. Si no se emplearan condensadores los resultados obtenidos son inferiores, como muestra la figura 12.1.

En definitiva, con la inclusión de los condensadores de 150 μ F el sistema está bien optimizado tanto para velocidades altas como bajas. Por lo tanto, que la batería se cargue o no de forma rápida depende solamente del recurso eólico disponible en cada momento.

Esto indica que se ha conseguido alcanzar el doble objetivo planteado al inicio del proyecto: obtener un sistema de generación eléctrica aislada que sea eficiente, pero cuyo coste sea inferior al de la mayoría de los sistemas existentes en la actualidad, de manera que pueda ser asumido más fácilmente por las poblaciones que requieren este tipo de sistemas de suministro. Los condensadores apenas incrementarán el coste de la instalación y mejorarán considerablemente su eficiencia.

BIBLIOGRAFÍA

REFERENCIAS RELATIVAS A PEQUEÑOS AEROGENERADORES:

- “Energía eólica”, Jaime Moragues y Alfredo Rapallini (Instituto Argentino de la Energía “General Mosconi”, 2003).
http://www.iae.org.ar/renovables/ren_eolica.pdf
- “Análisis dinámico de sistemas eléctricos con generación eólica”, Pablo Ledesma Larrea (Universidad Carlos III de Madrid).
<http://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=2213>
- “Energía eólica: tipos de generadores eólicos y sus aplicaciones”, Martín Giordano. (<http://tipos-de-energia.blogspot.com/2006/02/energa-elica-tipos-de-generadores.html>).
- “Whisper 100/200 technical specifications”, South Western (Arizona)
http://www.txspc.com/PDF/whisper_100-200_spec.pdf
- “A new generation of air”, SW (Arizona)
www.windenergy.com
- “Whisper 100”, Etaengineering
<http://www.etaengineering.com/page49.html>
y Southwest Windpower
<http://www.wholesalesolar.com/products.folder/wind-folder/whisper100.html>
- “Emulation of a small wind turbine system with a separately-excited wind turbine machine”, Md Arifujjaman, MT Iqbal, John Quaicoe (2008)
<http://ee.istanbul.edu.tr/eng/jeee/main/pages/issues/is81/81011.pdf>
- “Instalaciones microeólicas”, programa ALTENER de RES & RUE Dissemination, Alessandro Brusa y Elena Guarnone
<http://www.cec.europa.eu/campanas/medio%20ambiente/res&rue/htm/dossier/1%20eolica.htm>
- “Minieólica”, Bornay (2008)
<http://www.bornay.com/eolica/en/minieolica/8>
- “Home wind turbines”, Windenergy7 (2011)
<http://windenergy7.com/>

CARÁCTERÍSTICAS DE PALAS Y MOMENTO DE INERCIA DE LA TURBINA:

- “*Estimating wind turbines mechanical constants*”, A.G. González Rodríguez, M. Burgos Payán.
<http://www.icrepq.com/icrepq07/361-gonzalez.pdf>
- “*Rotor blade manufacturing and testing*”, Christoph Wolters y Christoph Lanaud (GE)
http://www.forwind.de/events/files/080910_ws_bladeshusumwind2008.pdf
- “*Bamboo as a potential material used for windmill turbine blades*”, Inger Stauning y Bent Sondergard (TEKSAM, 2009)
<http://rudar.ruc.dk/bitstream/1800/4705/1/Bamboo%20as%20a%20potential%20material%20used%20for%20windmill%20turbine%20blades.pdf>
- “*Wind turbine design*” (Wikipedia, 2010)
http://en.wikipedia.org/wiki/Wind_turbine_design
- “*Assessment of Research Needs for Wind Turbine Rotor Materials Technology*”, The National Academies Press (1991)
http://www.nap.edu/openbook.php?record_id=1824&page=35
- “*Woven materials: glass fibre*”, Favonius
<http://www.favonius.com/soaring/materials/material.htm>
- “*Composite materials / fiber glass*”, Ever Barbero (all-experts, 2004)
<http://en.allexperts.com/q/Composite-Materials-2430/fiberglass.htm>
- “*Controlling the green giants*”, The Glasgow insight into science and technology (GIST)
<http://the-gist.org/2011/02/controlling-the-green-giants/>
- “*Emulation of a small wind turbine system with a separately-excited wind turbine machine*”, Md Arifujjaman, MT Iqbal, John Quaicoe (2008)
<http://ee.istanbul.edu.tr/eng/jee/main/pages/issues/is81/81011.pdf>
- “*Turbines in USA*”, How products are made (2007)
<http://www.madehow.com/Volume-1/Wind-Turbine.html>
- “*High performance roving for wind turbine blade applications*”, OCV Reinforcements
http://www.ocvreinforcements.com/pdf/library/WindStrand_H_EPW17_w_w_03_2011_REV0.pdf

PERFILES NACA:

- “Energías renovables, perfiles aerodinámicos”, Universidad de Comillas
<http://www.iit.upcomillas.es/pfc/resumenes/4a4671e07c6a1.pdf>
- “Wind rotor blade construction, small wind systems for battery charging”, Teodoro Sanchez Campos (ITDG-UK, 2001)
<http://www.iit.upcomillas.es/pfc/resumenes/4a4671e07c6a1.pdf>
- “Perfiles NACA”, Taicar (www.miliamperioes.com, 2007)
<http://www.miliamperios.com/foro/ingenieria-del-aeromodelismo-f48/perfiles-naca-t122061.html>
- “NACA airfoil series”, Jeff Scott (www.aerospaceweb.org, 2001)
<http://www.aerospaceweb.org/question/airfoils/q0041.shtml>
- “NACA airfoil” (Wikipedia, 2011)
http://en.wikipedia.org/wiki/NACA_airfoil#
- “NACA 4-digit airfoil profile” (Scribd, 2011)
<http://es.scribd.com/doc/64267527/NACA-4-Digit-Delta>
- “Posicionamiento del rotor y la cola de un pequeño aerogenerador de eje horizontal debido a la influencia de los coeficientes de arrastre y sustentación que afectan la veleta de cola”, Ernesto Yoel Fariñas Wong, Sergio Jáuregui Rigo y Jesús Betancourt Mena (Universidad Central de Las Villas, 2008)
<http://www.cubasolar.cu/biblioteca/Ecosolar/Ecosolar27/HTML/articulo06.htm>
- “Soluciones técnicas para la instrumentación y el control de un túnel de viento para la optimización de los generadores eólicos de pequeña potencia que se proyectan fabricar en Cuba”, Beatriz Reyes Collado y Jerónimo García Faure (Universidad de Oriente, Cuba, 2011)
<http://www.cubasolar.cu/biblioteca/Ecosolar/Ecosolar29/HTML/articulo01.htm>
- “Introducción a los perfiles NACA” Sergio Esteban Roncero (Dpto ingeniería aeroespacial, Universidad de Ávila, 2009)
http://aero.us.es/adesign/Slides/Pautas/Tema_Extra_Introduccion_Perfiles_NACA.pdf

CORREAS DE TRANSMISIÓN:

- “*Introducción a las transmisiones por correa*”, Enrique Zallas Figueras, Jordi Martinez Miralles (Universitat Politècnica de Catalunya, 2008)
<http://em.upc.edu/docencia/estudis-de-grau/etseib/TFTM/quadern-de-treball/versio-castellana/leccion-4>
- “*Proyecto de elementos de transmisión flexibles*”, Marcelo Tulio Piovan (UTN-FRBB, 2004)
<http://www.frbb.utn.edu.ar/carreras/materias/elementosdemaquinas/cap06-01.pdf>
- “*Correas de transmisión*”, Wikipedia (2011)
http://es.wikipedia.org/wiki/Correa_de_transmisi%C3%B3n
- “*Transmisión de movimiento por correa*”, Portaleso
http://www.portaleso.com/portaleso/trabajos/tecnologia/mecanica/elementos_de_maquinas/correa.htm
- “*Engranaje*”, Scribd (2011)
<http://es.scribd.com/doc/50625918/Se-denomina-engranaje-o-ruedas-dentadas-al-mecanismo-utilizado-para-transmitir-potencia-de-un-componente-a-otro-dentro-de-una-maquina>
- “*Tema 5: correas*”, Universidad de Castilla-La Mancha (2009)
<http://www.uclm.es/profesorado/porrasysoriano/elementos/Tema05.pdf>
- “*Elementos flexibles para generar movimiento*”, Mectrol (1998)
<http://html.rincondelvago.com/elementos-flexibles-para-generar-movimiento.html>
- “*Correas trapezoidales*”, Mecapedia (2008)
http://www.emc.uji.es/d/mecapedia/correa_trapezoidal.htm
- “*Mantenimiento preventivo de correas de transmisión*”, Gates (2007)
http://www.gates.com/spain/file_save_common.cfm?thispath

BATERÍA:

- “Battery energy storage system based controller for a wind turbine driven isolated asynchronous generator”, India Conference (IEEE 2010)
http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=5712727
- “Carga de baterías: la teoría”, Enervolt Ibérica S.A. (2006)
http://www.interempresas.net/FeriaVirtual/Catalogos_y_documentos/531946/Catalogo_Solar_2007-2008.pdf
- “Cargador de baterías BL 18”, Woodward (2008)
http://www.dsf-technologies.com/upload/proddocspdf/proddocspdf_3_242.pdf
- “Cargadores industriales de baterías automatizados”, Varimak (2008)
<http://www.varimak.com/cargadores.html>